2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

전단하중을 받는 얇은 원통구조물의 좌굴해석 및 시험

Buckling Analyses and Tests for Thin Cylindrical Structures Subjecting the Shear Loads

구 경 회, 이 재 한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 현재 개발중인 액체금속로 원자로용기에 대한 지진좌굴 설계해석 기술 개발을 위하여 전단하중을 받는 얇은 원통구조물에 대한 축소 시험체를 설계/제작하고 이에 대한 좌굴 수치해석 및 특성시험을 수행하였다. J. Okada 등이 제안한 좌굴평가식을 사용하여 세장비 L/R=3.1, 1.6, 그리고 1.0 을 갖는 세가지 좌굴시험체를 결정하고 ANSYS 를 이용한 탄성 및 탄소성 좌굴 수치해석과 좌굴특성 시험을 수행하였다. 전단하중에 대한 좌굴 수치해석과 시험결과들은 잘 일치하였으며 세장비 L/R=3 이상인 경우에는 굽힘 좌굴, 세장비 L/R=1.0 이하로 작을 경우에는 전단좌굴, 그리고 세장비 L/R=1.6 영역에서는 전단과 굽힘좌굴이 동시에 발생하는 복합좌굴 특성이 나타났다.

ABSTRACT

In this paper, the buckling analyses and the tests for thin cylindrical structures subjecting shear load are carried out to develop the buckling design and analysis technology for liquid metal reactor. Using the buckling strength formulae proposed by J. Okada, the reduced test specimen were designed and fabricated, which have the slenderness ratio L/R=3.1, 1.6 and 1.0. Foe the test specimen, the buckling analyses using ANSYS and the tests using the hydraulic actuator are performed. From the comparison of the buckling loads between analysis and test, the analysis results are in good agreement with those of tests. The larger slenderness ratio over L/R=3 results in dominant bending buckling mode, smaller slenderness ratio under L/R=1 results in dominant shear buckling mode, and near L/R=1.6 region shows the mixed buckling mode which has the bending and shear buckling mode simultaneously.

1. 서 론

액체금속로는 $500^{o}C$ 이상의 고온과 5 기압이하의 저압에서 운전되며 이러한 고온, 저압 환경하에서 발생 가능한 열응력을 최소화하기 위하여 상대적으로 두께를 최소화한 박막구조로 되어 있다. 따라서 고온으로 운전되는 액체금속로에 있어서 지진하중에 대한 좌굴방지는 구조설계에 있어서 매우 중요한 설계사항중의 하나이다[1].

일반적으로 액체금속로 원자로용기와 같이 얇은 원통구조물이 전단하중을 받을 경우 발생 가능한 좌굴특성에는 크게 굽힘좌굴, 전단좌굴 그리고 굽힘과 전단 좌굴이 동시에 발생되는 복합 좌굴특성이 있을 수 있다[2,3]. 이러한 좌굴특성들은 원통구조물의 제원 즉, 길이, 외경, 두께와 관련된 세장비(L/R), 재료의 항복특성, 하중 경계조건 그리고 초기형상결함 정도등에 따라서 달라진다. 이러한 인자들 중에서 재료의 소성거동을 포함하는 항복특성과 초기형상결함은 얇은 원통형 실린더의 좌굴하중(buckling Load 또는 Limit Load)에 크게 영향을 미치며 세장비는 좌굴형상에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[3,4,5].

본 논문에서는 Okada 등이 제안한 설계평가식[2]을 사용하여 굽힘좌굴, 전단좌굴 그리고 복합좌굴 특성이 발생 가능한 3 가지 축소 좌굴시험체를 설계, 제작하여 세장비에 따른 얇은 원통구조물의 좌굴특성 시험을 수행하였다. 그리고 ANSYS 상용 유한요소 해석코드를 이용하여 축소 좌굴시험체에 대한 고유치 좌굴수치해석과 비선형 탄소성 좌굴수치해석을 수행하고 그 결과들을 시험 및 설계평가식 계산결과들과 비교분석함으로서 좌굴 수치해석 방법에 대한 타당성을 입증하였다.

2. 좌굴 해석 및 특성시험

2.1 좌굴시험체 설계/제작 및 시험

세장비에 따른 얇은 원통구조물의 좌굴특성을 살펴보기 위하여 Fig. 1 의 평가식에 의한 좌굴특성 평가결과들로 부터 순수 굽힘좌굴이 발생할 수 있는 세장비 L/R=3.1(Model-A), 복합좌굴이 발생할 수 있는 세장비 L/R=1.6(Model-B), 그리고 순수 전단좌굴이 발생할 수 있는 세장비 L/R=1.0(Model-C)의 3 가지 좌굴시험체를 결정하였다. Table 1 은 결정된 원통구조물 좌굴시험체에 대한 제원을 나타내며 두께와 외경은 모두 동일한 t=0.5mm 와 D=103mm 이며 재질은 304 스텐인레스강이다.

Fig. 2 는 좌굴특성 시험에 사용된 1 축시험장치 개념도를 나타낸 것이다. 시험에 사용된 유압가진기는 최대하중 2.5 톤, 최대양정 ±12.5cm 인 독일의 Shenck 사 제품이며 제어기는 Labtronic 8800 을 사용하였다. 좌굴시험에는 변위제어 하중을 사용하였으며 좌굴특성을 나

타내는 변위-반력 곡선을 구하기 위하여 준정적 변위하중을 약 1.0cm 까지 적용하였다. 하중이 가해지는 시험체 하단부와 유압가진기는 안정된 하중전달을 위하여 연결핀으로 결합시켰다.

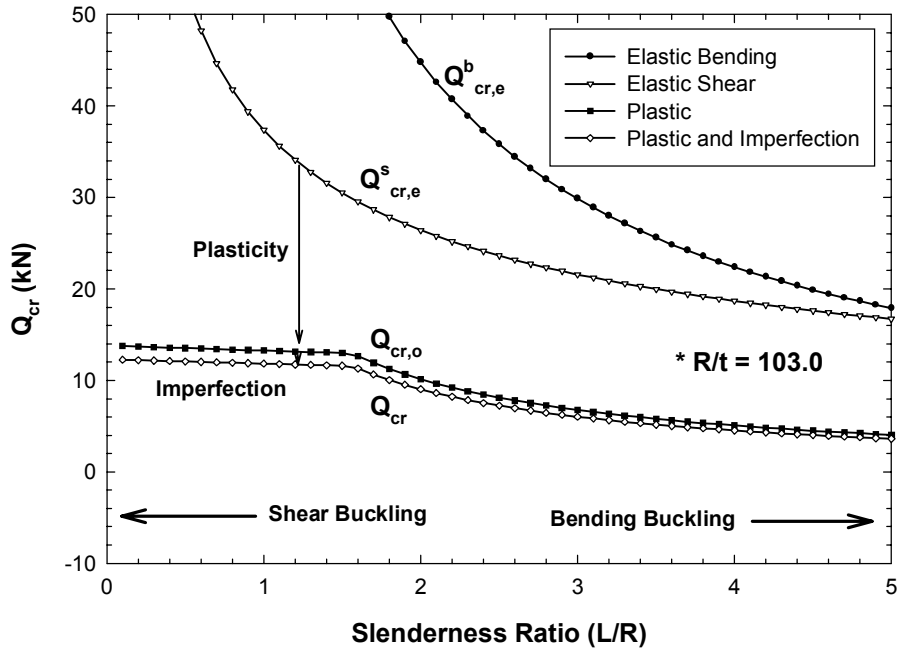


Fig. 1 Results of Buckling Strength Evaluation by Formulae (t =0.5mm, D=103mm, L=103mm)

Table 1. Dimensions of Buckling Test Specimen

	Model-A (Bending)	**Model-B (Bending + Shear)**	**Model-C (Shear)**
L(mm)	160.0	80.0	50.6
D(mm)	103.0	103.0	103.0
t(mm)	0.5	0.5	0.5
(L/R)	3.1	1.6	1.0

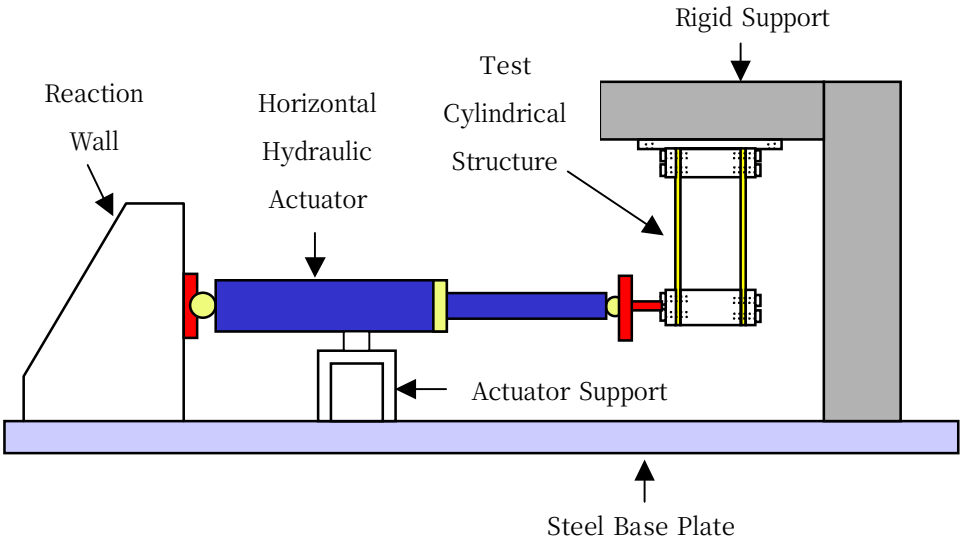


Fig. 2 Schematic Drawing of 1-Directional Buckling Test facility

2.2 좌굴 수치해석

결정된 원통구조물 좌굴시험체에 대한 좌굴특성을 평가하기 위하여 고유치 좌굴해석과 비선형 탄소성 좌굴 수치해석을 수행하였다. 좌굴 수치해석을 위해 ANSYS 유한요소 상용프로그램[6]을 사용하였으며 프로그램에서 제공하는 소성대변형쉘 요소인 4 절점 SHELL43 요소를 사용하였다. 해석에 사용된 상온에서의 재료상수는 탄성계수 E=194GPa, 포아송비 ν=0.29, 밀도 ρ=7800kg/m^3 이며 비선형 탄소성 해석에 사용된 재료의 응력-변형률 곡선은 Fig. 3 과 같다.

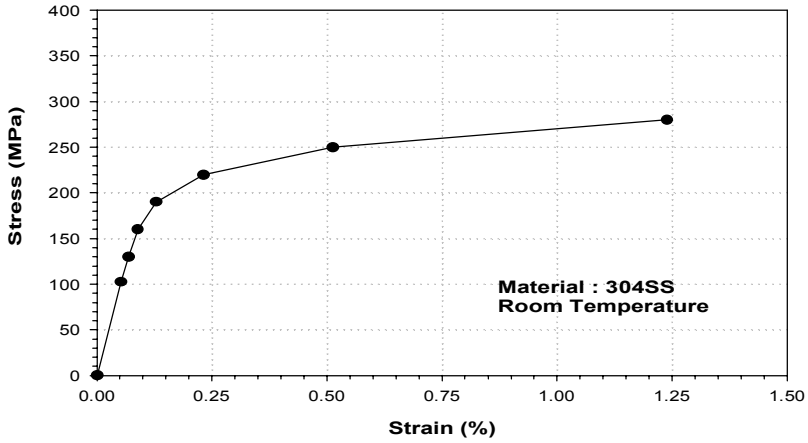
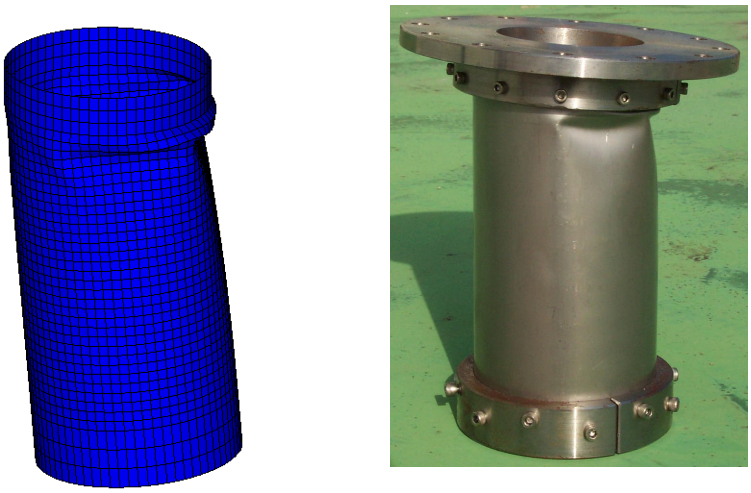


Fig. 3 Stress-Strain Curve Used in Nonlinear Elastic-Plastic Buckling Analysis

2.3 해석 및 실험결과 비교분석

굽힘좌굴 특성이 지배적으로 나타날 수 있는 세장비 L/R=3.1 을 갖는 Model-A 시험체에 대한 좌굴형상 시험 및 해석결과는 Fig. 4 와 같다. 그림에서와 같이 하중이 가해지는 지점의 반대편 상부 지지점 부위에서 평가식에서 예측된 순수 굽힘좌굴 형상이 나타났으며 시험과 해석에 의한 좌굴형상 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 5 는 Model-A 시험체에 대한 변위-반력 곡선 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 시험에 의한 좌굴하중은 약 Q_{cr} =7.6kN, 평가식은 Q_{cr} =6kN, 수치해석은 Q_{cr} =7kN 으로서 평가식과 수치해석에 의한 좌굴하중 예측 결과가 시험결과와 매우 근접하며 특히 수치해석에 의한 변위-변력 곡선이 시험결과와 잘 일치한다.



(Analysis) (Test)

Fig. 4 Buckling Shape of Mode-A Specimen

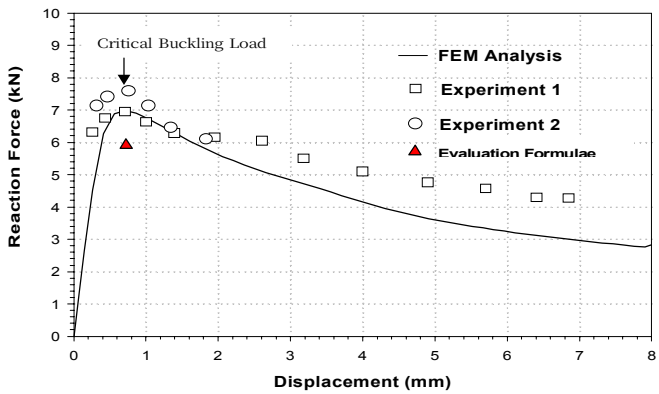
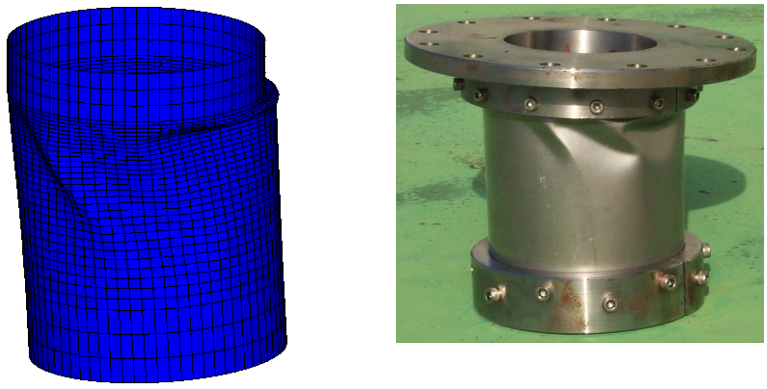


Fig. 5 Load-Displacement Curves for Model-A Specimen

Fig. 6 은 굽힘과 전단좌굴 특성이 함께 나타날 수 있는 세장비 L/R=1.6 을 갖는 Model-B 시험체에 대한 좌굴형상 시험 및 해석결과를 나타낸 것이다. 좌굴평가식에서 예측된 바와 같이 하중이 가해지는 지점의 반대편 상부 지지점 부위에서 굽힘좌굴이 나타나고 상부 지지점 둘레에 경사각을 갖는 전단좌굴이 동시에 나타나는 복합 좌굴특성이 발생함을 알 수 있다. 수치해석에 의한 좌굴형상 예측결과를 시험결과와 하중작용방향에 대해 측면 및 정면도에서 살펴보면 잘 일치한다. Fig. 7 은 Model-B 시험체에 대한 변위-반력 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 시험에 의한 좌굴하중은 약 Q_{cr} =12kN, 평가식은 Q_{cr} =10.8kN, 수치해석은 Q_{cr} =11kN 으로서 평가식과 수치해석에 의한 좌굴하중 예측 결과는 모두 시험결과에 비해 약간 작으면서도 매우 근사하게 나타났다.



(Analysis) (Test)

Fig. 6 Buckling Shape of Model-B Specimen

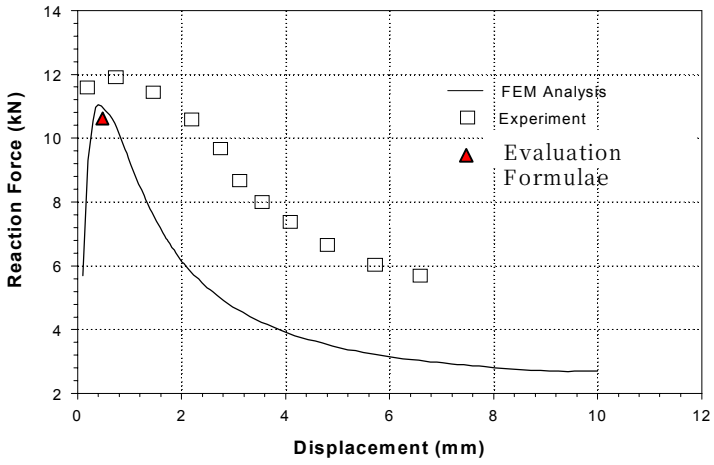
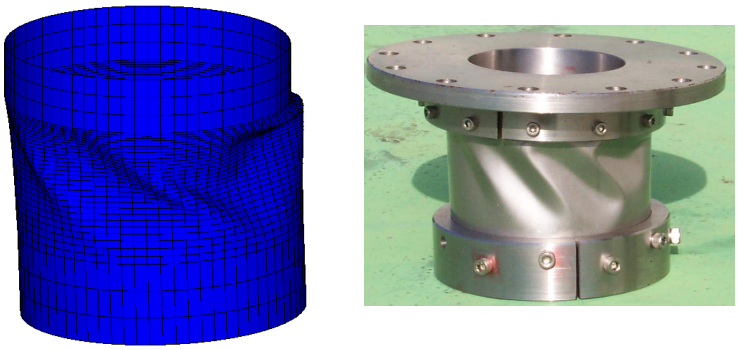


Fig. 7 Load-Displacement Curves for Model-B Specimen

전단좌굴 특성이 지배적으로 나타날 수 있는 세장비 L/R=1.0 인 Model-C 시험체에 대한 좌굴형상 시험 및 해석결과는 Fig. 8 과 같다. 그림에서와 같이 시험 및 해석결과 모두에서 전단 좌굴특성이 지배적으로 나타났으나 하중이 가해지는 지점의 반대편 상부 지지점 부위에서 약간의 굽힘좌굴 형상이 함께 나타났다. Fig. 9 는 변위-반력 곡선을 나타낸 것으로 시험에 의한 좌굴하중은 약 Q_{cr} =17.5kN, 평가식은 Q_{cr} =11kN, 수치해석은 Q_{cr} =12.2kN 이며 시험결과가 평가식 및 수치해석 결과에 비해 약간 크게 나타났다.



(Analysis) (Test)

Fig. 8 Buckling Shape of Model-C Specimen

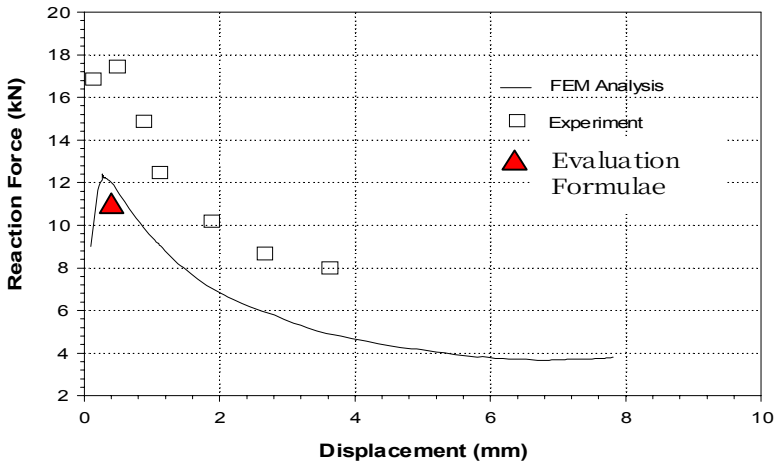


Fig. 9 Load-Displacement Curves for Model-C Specimen

좌굴하중에 대한 결과로부터 평가식과 수치해석에 의한 좌굴하중 평가결과는 모두 시험값에 비해 하한계값을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 사용한 좌굴평가식과 수치해석 방법은 모두 보수적 좌굴설계 관점에서 최소 보수성을 갖고 정확히 좌굴하중을 결정할 수 있는 방법으로 제시될 수 있다.

Fig. 10 은 세장비에 따른 좌굴하중 평가결과들에 대한 종합적인 내용을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 고유치 좌굴 수치해석에 의한 좌굴하중 계산값들은 평가식에 의한 탄성 좌굴하중 계산결과들과 유사한 결과를 보여주며 시험결과에 비하여 크게 과대평가되는 것으로 나타났다. 따라서 전단하중을 받는 실제 얇은 원통구조물의 좌굴하중 평가를 위해 고유치 좌굴 수치해석방법을 사용하는 것은 적절하지 않음을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 사용한 비선형 탄소성 좌굴 수치해석방법은 각 세장비 영역 모두에 걸쳐 시험 및 평가식 결과들과 매우 유사한 결과를 나타냄으로써 소성거동이 얇은 원통의 좌굴특성에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

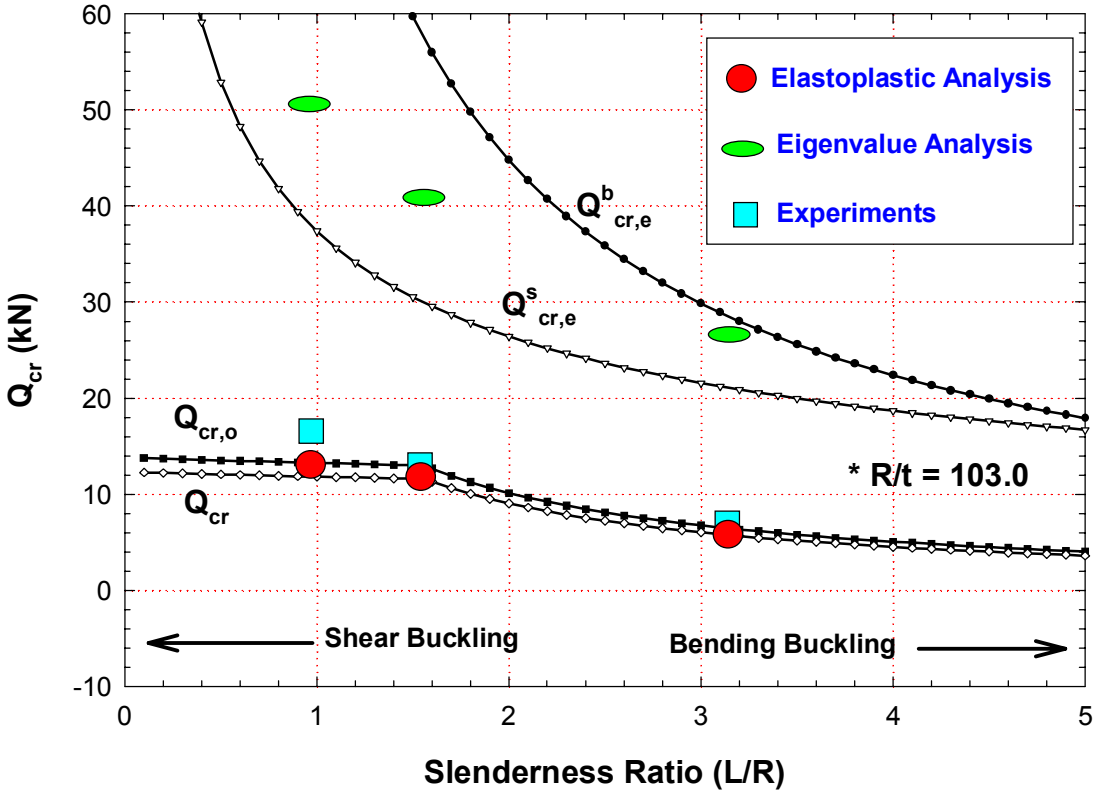


Fig. 10 Comparison of Buckling Strength Values Corresponding to Slenderness Ratio by Formulae, Analyses and Tests

3. 결 론

본 논문에서 수행한 전단하중을 받는 얇은 원통구조물의 좌굴 해석 및 특성시험 결과로부터 세장비가 작은 영역에서는 순수 전단좌굴, 세장비가 클 경우에는 순수 굽힘좌굴이 지배적으로 나타나며 중간영역에서는 전단과 굽힘좌굴이 동시에 나타나는 복합

좌굴 특성이 나타나는 결과를 얻었다.

본 논문에서 사용한 좌굴평가식과 비선형 탄소성 해석방법은 모두 시험값에 비해 하한계 값을 나타냈으며 보수적 좌굴설계 관점에서 최소 보수성을 갖고 정확히 좌굴 하중을 결정할 수 있는 방법으로 제시될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Subsection NH, 1995.
2. J.Okada, K.Iwata, et.al, “An Evaluation Method for Elastic-Plastic Buckling of Cylindrical Shells under Shear Forces,” Nuclear Engineering and Design, Vol.157, pp.65-79, 1995.
3. K. Tsukimori, “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, 1996.
4. T. Murakami, et al, “The Effects of Geometrical Imperfection on Shear Buckling Strength of Cylindrical Shells,” Proc. SMiRT-11, Vol. E, 1991.
5. G.H. Koo, B. Yoo and J.B. Kim, “Buckling Limit Evaluation for Reactor Vessel of KALIMER Liquid Metal Reactor Under Lateral Seismic Load,” Int. Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.78, pp 321-330, 2001.
6. ANSYS User’s Manual for Revision 5.1, Volume I,II,III.