

## 세장비 변화에 따른 얇은 원통구조물의 좌굴특성 평가

# Evaluation of Buckling Characteristics with Respect to Slenderness Ratio for Thin Cylindrical Structures

김대현, 구경희, 이재한

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요약

본 연구는 액체금속로 원자로 용기에 대한 지진좌굴 특성 평가의 일환으로 수행되었다. 축소 원통형 구조물에 대한 좌굴 특성 시험을 위하여, 세가지 모델(세장비 1.0, 2.0, 4.8)을 선정하고 Okada 등이 제안한 평가식과 탄소성 유한요소 방법을 이용하여 좌굴특성을 해석 및 평가한 결과 세장비가 1.0 이하인 경우는 전단좌굴이 지배적이고, 세장비가 2.0인 영역에서는 전단과 굽힘이 동시에 나타나는 복합 좌굴이 나타났고, 세장비가 4.8 이상에서는 순수 굽힘좌굴이 지배적인 것으로 나타났다. 좌굴하중에 대한 수치해석 결과는 소성 거동을 고려한 평가식의 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

### Abstract

This work was done as one of the pre-research of buckling behavior for LMR reactor vessel. For the reduced scale buckling test, the three types of test specimen (slenderness ratio 1.0, 2.0, 4.8) was selected. Using the buckling formulae by Okada and the elastic-plastic finite element method, the buckling characteristics are investigated. From the results of buckling load evaluations, as the slenderness ratio decreases, the buckling load increases and a deflection shape approaches shear buckling mode. As the slenderness increases, the deflection approaches bending buckling mode. In comparison of buckling loads, the calculated buckling loads by the elastic-plastic finite element method are in good agreement with those of the evaluation formulae considering with plastic effect.

## 1. 서론

액체금속로의 구조물은 특성상 고온, 저압에서 운전되며, 고온, 저압 환경 하에서 발생 가능한 열응력을 최소화하기 위하여 상대적으로 두께를 최소화한 박막구조로 되어 있다. 이러한 구조의 액체금속로에 있어서 지진하중에 대한 좌굴방지는 구조설계에 있어 매우 중요한 설계사항중의 하나이다<sup>1)</sup>.

얇은 원통구조물이 전단하중을 받을 경우 발생 가능한 좌굴특성에는 크게 굽힘좌굴, 전단좌굴 그리고 굽힘과 전단 좌굴이 동시에 발생하는 복합 좌굴특성이 있을 수 있다<sup>2),3)</sup>. 이러한 좌굴특성들은 원통구조물의 제원 즉, 길이, 외경, 두께와 관련된 세장비(L/R), 재료의 항복특성, 하중 경계조건 그리고 초기형상결함 정도 등에 따라서 달라진다. 이런 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<sup>3),4),5)</sup>.

본 연구는 지진 좌굴특성 평가를 위한 축소 원통구조물에서 세가지 모델을 선정하고, 세장비 변화에 따른 소성거동을 고려한 평가식과 상용유한요소 해석코드(ANSYS)를 이용하여 비선형 탄소성 좌굴수치해석을 수행한 결과를 비교 분석하였다. 또한 차후 초기형상결함을 고려한 좌굴해석모델의 평가를 위하여 형상결함 측정장치를 제안하였다.

## 2. 원통구조물의 좌굴특성 설계평가식

원자로용기 등의 얇은 원통구조물에 대한 좌굴 설계 평가는 여러 국가에서 독자적인 평가식을 제안하고 있다<sup>1),2),6),7),8)</sup>.

본 연구에서는 Okada 등이 제안한 이론적 좌굴평가식<sup>2)</sup>을 검토하고 이를 이용하여 원자로용기의 원통구조물에 대한 좌굴특성을 평가하였다.

좌굴특성에서 소성거동과 구조물에서 발생 가능한 초기형상결함의 영향을 고려한 평가식은 다음과 같다.

$$Q_{cr} = a \text{Min}(Q_{cr,0}^b, Q_{cr,0}^s) \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 초기 형상 결함 계수이다. 또한,

$$Q_{cr,0}^b = y_b \eta_c Q_{cr,e}^b \quad (2)$$

$$Q_{cr,0}^s = y_s \eta_s Q_{cr,e}^s \quad (3)$$

위의 계수들은 원통구조물의 반경(R), 두께(t), 길이(L), 탄성계수(E), 0.2% 진응력 ( $\sigma_{0.2}$ ), 포와송비( $\nu$ )의 함수로 결정된다.

$Q_{cr,0}^b$  : 이론적 탄성 굽힘 좌굴 하중

$Q_{cr,0}^s$  : 이론적 전단 좌굴 하중

$\eta_c$  : 축 방향 압축좌굴에 대한 소성 감소 계수

$\eta_s$  : 전단 좌굴에 대한 소성 감소 계수

$y_b$  : 축응력 기여계수

$y_s$  : 전단응력 기여계수

$$Q_{cr,e}^b = \frac{\pi R^2 t}{L} \sigma_{cr,e}^c : \text{탄성 굽힘 좌굴 하중} \quad (4)$$

$$Q_{cr,e}^s = \frac{1}{2} A \tau_{cr,e}^s : \text{탄성 전단 좌굴 하중} \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

구조물의 좌굴강도를 감소시키는 초기 결함형태는 좌굴모우드와 근사한 결함형상이 가장 심각한 결과를 나타내는 것으로 연구된 바 있다<sup>4)</sup>.

위 식들에서 Okada 등은 유한요소해석법을 이용한 다양한 경우의 수치해석을 통하여 다음과 같은 초기형상결함 감소계수를 제안하였다.

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

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

설계 평가식을 적용할 수 있는 얇은 원통구조물의 형상 범위는  $0.5 < L/R < 5.0$  그리고  $50.0 < R/t < 500.0$  이다.

Fig. 1 은 위 평가식에 대한 계산 흐름도<sup>2)</sup>를 나타낸 것이다.

### 3. 얇은 원통구조물에서 세장비 변화에 따른 좌굴해석 및 평가

세장비 변화에 따른 좌굴해석은 Okada 등의 평가식을 이용하였으며, 수치해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.6<sup>9)</sup> 에서 비선형 좌굴해석을 위한 소성대변형 쉘 요소인 4절점 Shell43 요소를 사용하였다. 또한 해석상의 편의를 위해 1/2 대칭모델을 이용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 2는 해석에 사용된 원통구조물의 개념도를 나타낸 것으로, 이 모델은 Shear load 를 가할 때 국부적인 변형을 방지하기 위하여 상·하단을 변형이 허용되지 않는 강체로 규정하고 자유도를 각각 구속하였다. 사용된 재료는 304 Stainless Steel 이며, 좌굴 평가식에는 탄성계수  $E=194\text{GPa}$ , 포와송비  $\nu=0.29$ , 밀도  $\rho=7800\text{kg/m}^3$ , 0.2% 진응력  $\sigma_{0.2}=225.6\text{MPa}$  의 재료상수를 사용하였다. 비선형 탄소성 해석에 사용된 재료의 응력-변형률 곡선은 Fig. 3과 같다. Table 1. 은 위 조건과 차후 실시될 실험 조건을 고려하여 세장비 (Slenderness Ratio :  $L/R$ )에 따라 여러 형상이 나올 수 있도록 결정하였다.

Fig. 4는 형상비( $R/t$ )가 200.0 ( $t=0.5\text{mm}$ ,  $D=200\text{mm}$ ) 인 얇은 원통구조물에 대한 세장비( $L/R$ ) 변화에 따른 좌굴하중의 변화를 Okada 의 좌굴평가식에 의해 계산한 결과를 나

타내고 있다. 그림에서보면 소성거동의 영향은 좌굴하중에 크게 작용하는 것을 보여주고 있으며 초기 형상결함의 영향은 매우 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고 탄성거동의 영향을 고려한 탄성굽힘 좌굴하중과 탄성전단 좌굴하중은 세장비가 작아질수록 급격하게 증가함을 알 수 있다. 또한 세장비의 증가에 따라 전단보다는 굽힘에 의한 좌굴 영향을 받게 됨을 알 수 있다. 즉 원통구조물의 길이가 길어질수록 전단좌굴 특성에서 굽힘좌굴 특성으로 변화됨을 알 수 있다.

Fig. 5와 6은 각각 1.0, 2.0, 4.8 의 세장비를 갖는 해석모델에 대한 좌굴형상 및 결과를 나타낸 것이다. 세장비 1.0을 갖는 해석모델은 전체적으로 원통 둘레에 경사각을 갖는 전단하중이 지배적인 형상을 보이고 있으며 하중이 가해지는 지점의 반대편 상부 지지점 부위에서 약간의 굽힘좌굴 형상이 나타났다. 세장비 2.0을 갖는 모델은 하중이 가해지는 지점의 반대 상부 지지점 부분에서 굽힘좌굴과 원통 둘레에는 경사각을 갖는 전단좌굴이 동시에 나타나는 복합좌굴특성이 발생하였다. 세장비 4.8은 하중이 가해지는 지점의 반대편 상부 지지점 부위에서 순수 굽힘좌굴 형상이 나타났다.

Fig. 7은 세장비 변화에 따른 평가식과 수치해석 결과들을 종합적으로 도시한 그림이다. 그림에서 나타난 것처럼 평가식과 수치해석에 의한 좌굴하중 예측 결과는 비교적 근사하게 나타났다. 세가지 세장비 변화에 대한 모델들은 모두 소성거동에 의해 좌굴특성이 크게 영향을 미치고 있는 것으로 나타나고 있다.

## 5. 결론

본 연구에는 얇은 원통구조물에서 세장비에 따른 좌굴특성을 평가식과 수치해석을 이용하여 해석한 결과에서 세장비가 1.0 이하인 경우에는 전단좌굴이 지배적으로 나타났으며, 세장비가 2.0 인 영역에서는 전단과 굽힘을 동시에 갖는 복합 좌굴특성이 나타났고, 세장비가 4.8 이상인 영역에서는 굽힘좌굴이 지배적으로 나타나는 특성으로 갖는다는 것을 알 수 있었다. 또한 얇은 원통구조물에서의 좌굴하중은 소성거동에 크게 영향을 받으며 이에 따라서 좌굴하중의 결정에는 비선형 탄소성 좌굴 수치 해석방법이 요구됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 제시된 모델 및 결과는 좌굴실험을 바탕으로 검증할 예정이며, 추가적으로 Fig. 8 와 같은 측정장치의 개발을 통해 다각적인 초기형상결함의 영향을 고려한 얇은 원통구조물에 대한 체계적인 연구를 수행할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 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) ASME Code Case N284-1 Metal Containment Shell Buckling Design Methods, Class MC Section III, Division I.
- (7) RCC-MR Section I, Subsection B: Class 1 Components, June 1985.
- (8) RCC-MR, Appendix 7, Analyses taking Account of Buckling, June 1985.
- (9) ANSYS User's Manual, ANSYS Inc.

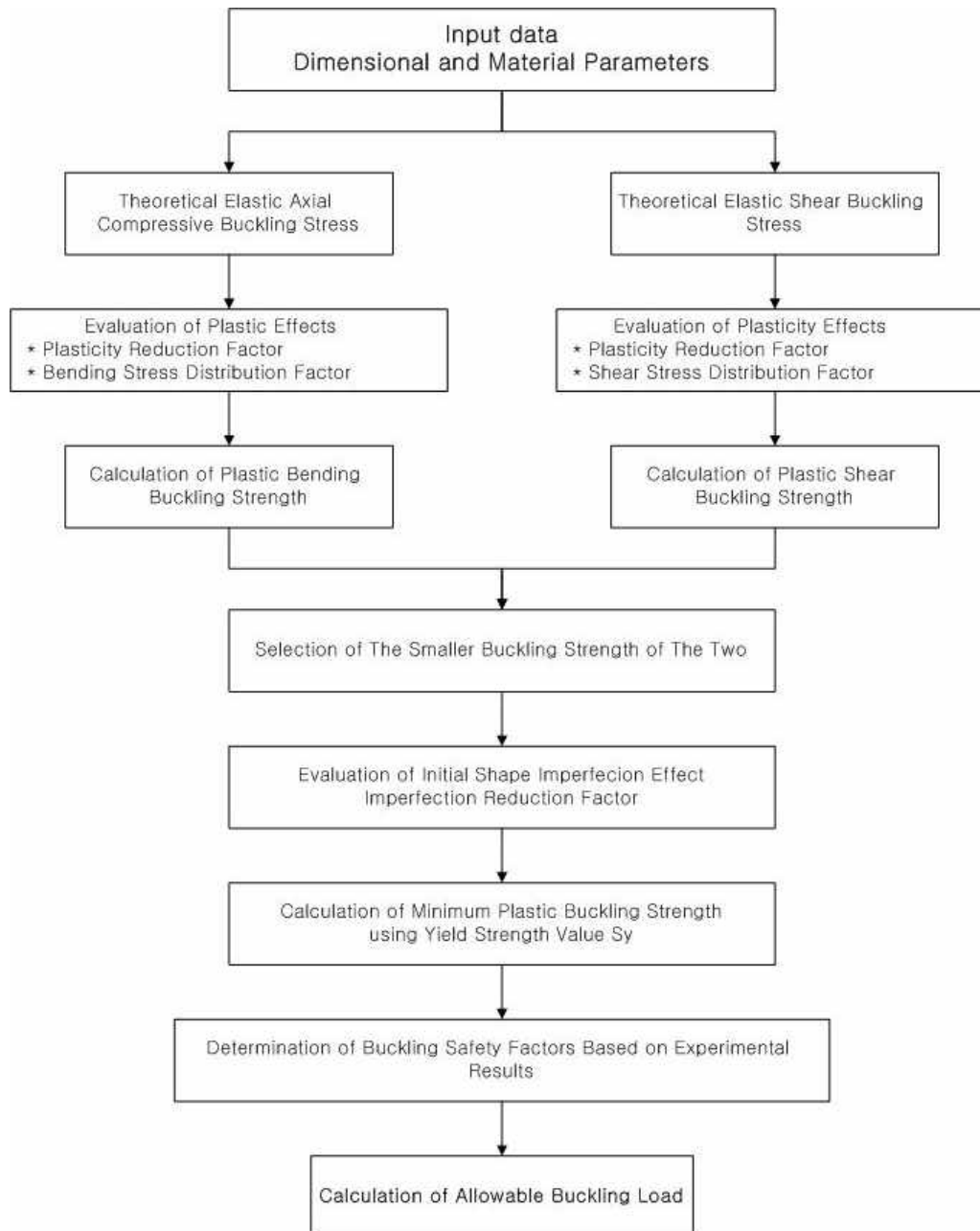


Fig. 1 Flow of the evaluation formulac<sup>2)</sup>

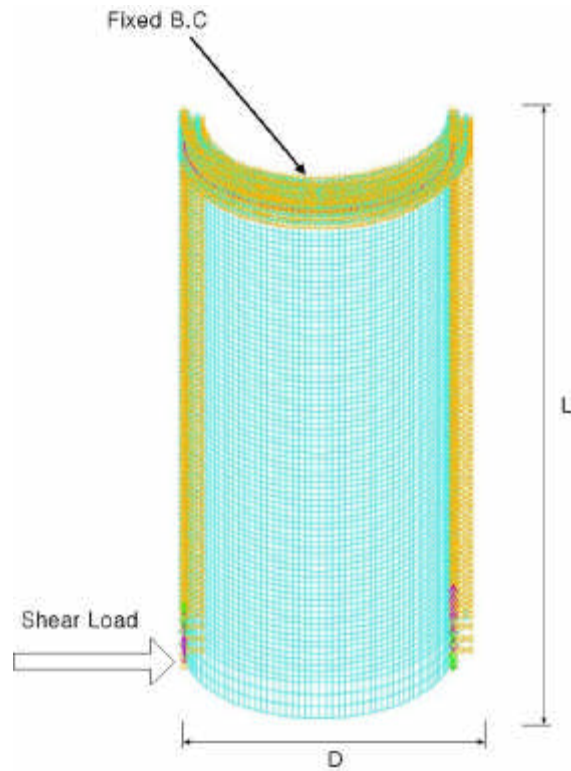


Fig. 2 FEM model (Cylindrical Structure)

Table 1. Determined Dimensions of Buckling Test Specimen

	L(mm)	D(mm)	t(mm)	L/R	Buckling Load(kN)		Shape
					평가식	수치해석	
Model-A	100	200	0.5	1.0	17.21	24.05	Shear
Model-B	200	200	0.5	2.0	13.75	17.33	Mixed
Model-C	480	200	0.5	4.8	5.73	8.50	Bending



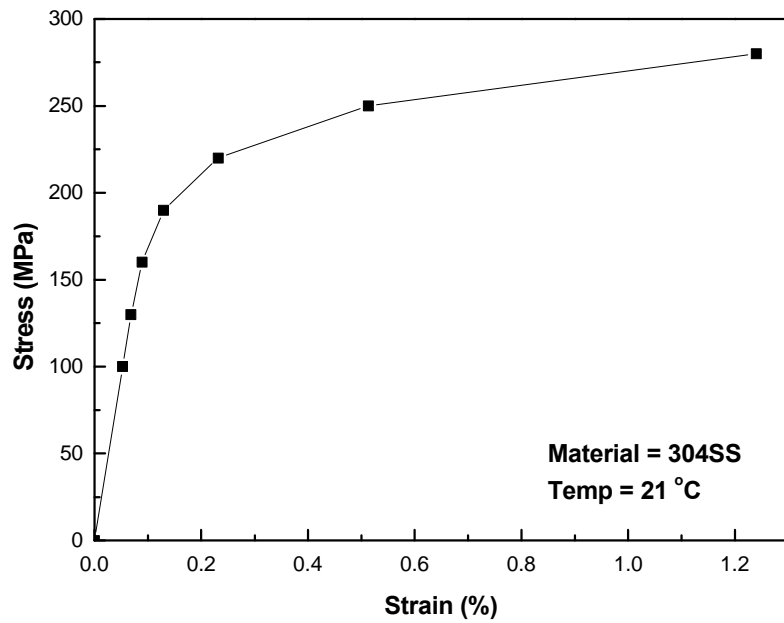


Fig. 3 Stress-Strain Curve in Nonlinear Elastic-Plastic Buckling Analysis

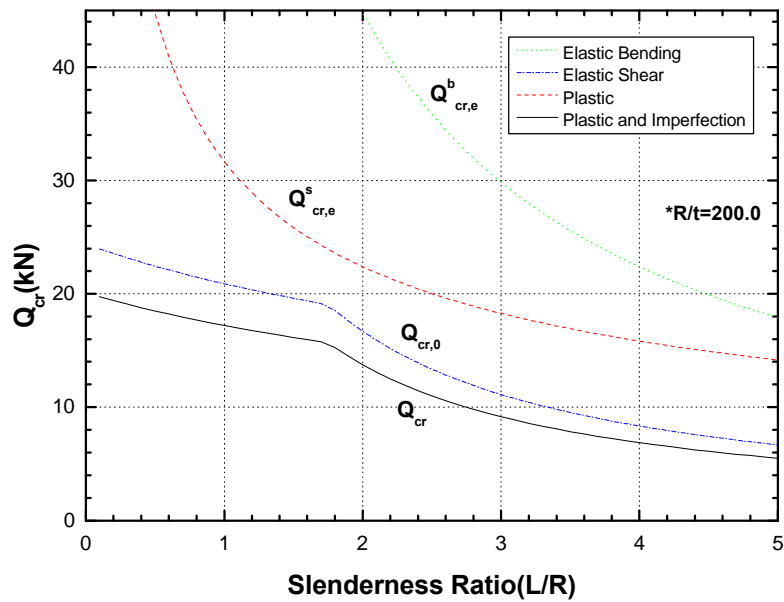


Fig. 4 Results of Buckling Strength Evaluation by Formulae ( $t=0.5\text{mm}$ ,  $D=200\text{mm}$ )

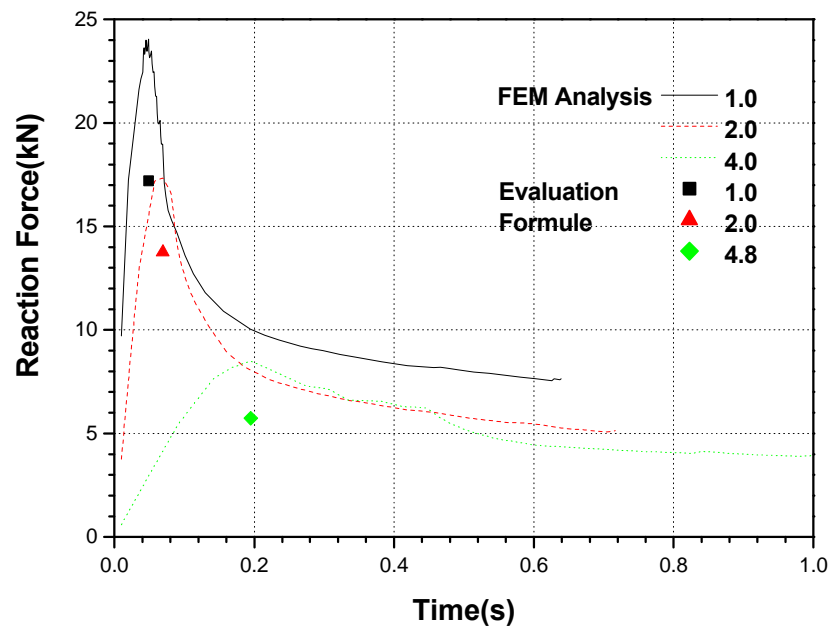
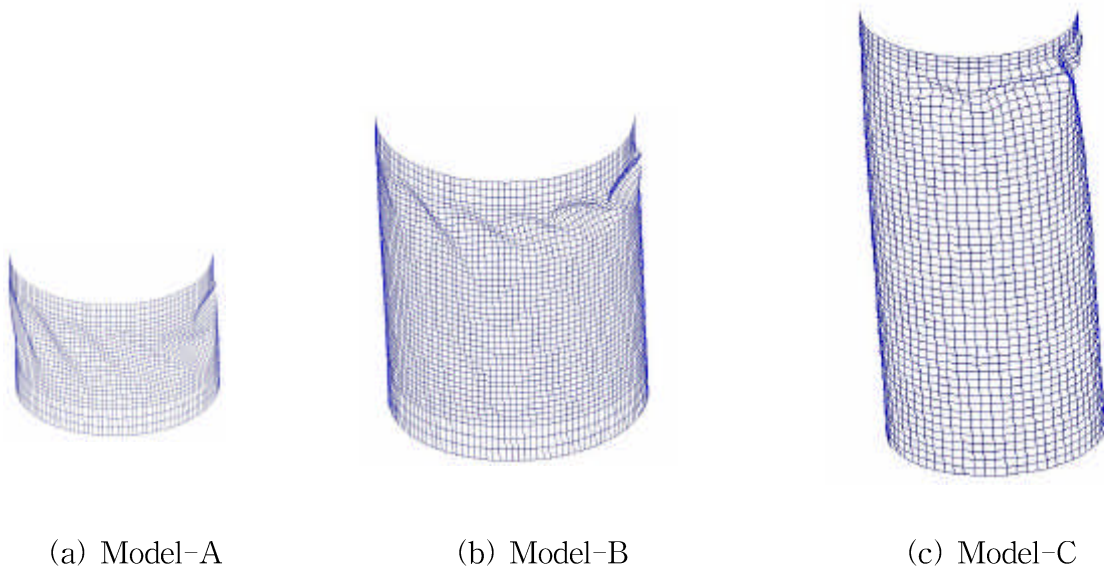


Fig. 5 Load-Time Curves for Model A,B,C Specimen



(a) Model-A

(b) Model-B

(c) Model-C

Fig. 6 Buckling Shape of Model A,B,C Specimen

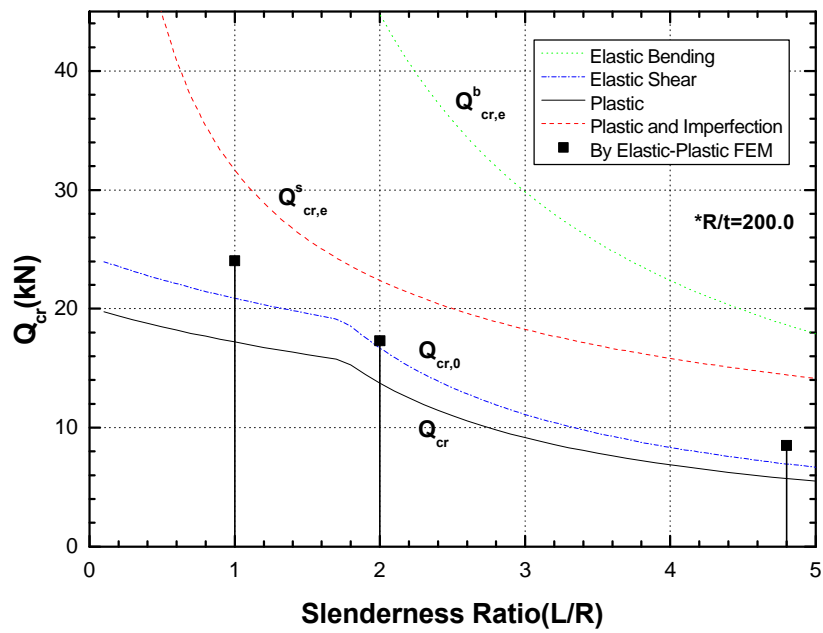


Fig. 7 Comparison of Buckling Strength Values Corresponding to Slenderness Ratio by Formulae, Analyses

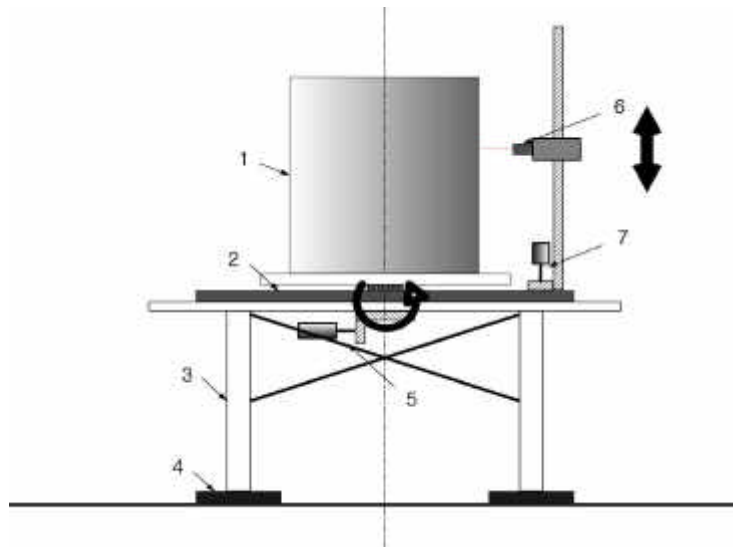


Fig. 8 Concept of Imperfection Measurement Facility for Cylindrical Structures