

전단하중을 받는 얇은 원통구조물의 세장비에 따른 좌굴특성 평가 및 시험

Evaluation and Test of Slenderness Ratio Effect on Buckling Characteristics of Thin Cylindrical Structures Subjecting the Shear Loads

구 경 회† 김 종 범* 이 재 한**
Koo, Gyeong-Hoi Kim, Jong-Bum Lee, Jae-Han
(논문접수일 : 2002년 1월 21일 ; 심사종료일 : 2002년 8월 30일)

요 지

본 논문의 목적은 전단하중을 받는 얇은 원통구조물의 세장비에 따른 좌굴특성을 보다 깊이 있게 검토하는 것이다. 이를 위하여 J. Okada 등이 제안한 좌굴평가식을 사용하여 세장비에 따른 좌굴강도 평가를 수행하였다. 좌굴강도 평가 결과들로부터 세장비 $L/R=3.1$, 1.6 , 그리고 1.0 을 갖는 세가지 좌굴시험체를 결정하고 이에 대한 수치해석과 좌굴특성시험을 수행하였다. 그 결과, 세장비 $L/R=3$ 이상인 경우 평가식에서 예측된 바와 같은 굽힘좌굴이 지배적으로 나타났으며 세장비 $L/R=1.0$ 이하로 작을 경우에는 전단좌굴이 지배적으로 나타났고, 세장비 $L/R=1.6$ 영역에서는 전단과 굽힘좌굴이 동시에 발생하는 복합좌굴 특성이 나타났다. 그리고 수치해석과 평가식에 의한 좌굴특성평가 결과는 시험결과들과 잘 일치하였다.

핵심용어 : 좌굴강도, 세장비, 전단좌굴, 굽힘좌굴, 복합좌굴

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the slenderness ratio effect on buckling characteristics of thin cylindrical structures subjecting the shear loads in detail. To do this, the buckling strength evaluations were carried out with using the evaluation formulae proposed by J. Okada. From the results of the buckling strength evaluations, the three types of scaled cylindrical test specimen, which have $L/R=3.1$, 1.6 , and 1.0 , are determined for the numerical analyses and tests. From results, 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. Most results of buckling characteristics obtained by the numerical analyses and the evaluation formulae are in good agreement with those of tests.

Keywords : buckling strength, slenderness ratio, shear buckling, bending buckling

† 책임저자, 한국원자력연구소 선임연구원 공학박사
전화: 042-868-2950; Fax: 042-868-8363
E-mail: ghkoo@kaeri.re.kr

* 한국원자력연구소 선임연구원 공학박사

** 한국원자력연구소 책임연구원 공학박사

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 12월 31일까지 본 학회에
보내주시면 2003년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

원통형 실린더 형상은 유체나 가스 저장용기 등으로 매우 다양하게 산업 전반에 걸쳐 사용되고 있으며, 특히 원자력 발전소의 압력용기로 널리 사용되고 있다. 본 논문의 주 목적은 기존의 경수로 원자로용기에 비해 상대적으로 두께가 매우 얇은 액체금속로 원자로용기에 대한 좌굴설계 해석방법을 개발하기 위한 기초연구의 일환이다. 액체금속로는 500℃ 이상의 고온과 5기압 이하의 저압에서 운전되며, 이러한 고온, 저압 환경 하에서 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 얇은 원통구조물이 전단하중을 받을 경우 발생 가능한 좌굴특성에는 크게 굽힘좌굴, 전단좌굴 그리고 굽힘과 전단 좌굴이 동시에 발생하는 복합 좌굴특성이 있을 수 있다.^{2),3)} 이러한 좌굴특성들은 원통구조물의 재료, 길이, 외경, 두께와 관련된 세장비(L/R), 재료의 항복특성, 하중 경계조건 그리고 초기형상결함 정도 등에 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)~5)}

본 논문에서는 전단하중을 받는 얇은 원통구조물에 대한 좌굴특성 평가를 위하여 J. Okada 등에 의하여 이론적 방법으로 제안된 설계평가식²⁾을 검토하고 이로부터 재료의 소성거동과 초기형상결함이 세장비에 따라서 좌굴하중에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 설계평가식을 사용한 좌굴 민감도해석으로부터 굽힘좌굴, 전단좌굴 그리고 복합좌굴 특성이 발생 가능한 3가지 축소 좌굴시험체를 설계, 제작하여 얇은 원통구조물에 대한 좌굴특성 시험을 수행하고, 세장비에 따른 좌굴특성 변화를 검증하였다. 그리고 ANSYS 상용 유한요소 해석코드를 이용하여 축소 좌굴시험체에 대한 고유치 좌굴수치해석과 비선형 탄소성 좌굴수치해석을 수행하고 그 결과들을 시험 및 설계평가식 계산결과들과 비교분석함으로써 좌굴 수치해석 방법에 대한 타당성을 입증하였다.

2. 얇은 원통구조물 좌굴특성 평가법

2.1 설계평가식에 의한 좌굴특성 평가법

액체금속로 격납용기를 비롯하여 원자로용기 등의 얇은 원통구조물에 대한 좌굴설계 평가를 위하여 국외 원자력 선진국에서는 독자적으로 좌굴평가식을 개발하고 있다. 미국의 경우에는 금속격납용기에 대해 형상 및 보강재 여부에 따른 상세한 좌굴평가방법을 ASME Code Case N284-1 제시하고 있으며⁶⁾, 좌굴불안정성에 대한 좌굴설계기준을 ASME Section III Division 1 Subsection NH에 규정하고 있다.¹⁾ 프랑스의 경우 좌굴 해석방법에 대한 구분 및 평가체계를 RCC-MR RB 3113, 3270 그리고 부록 7에 상세히 규정하고 있다.^{7),8)} 일본은 1987년부터 액체금속로 원자로용기에 대한 지진좌굴 평가지침서를 개발해오고 있으며 일본전력중앙연구소(CRIEPI)는 실험적 결과에 기초한 좌굴평가식을 제안한 바 있고⁹⁾ JNC(Japan Nuclear Cycle Development Institute)는 이론적 방법에 기초한 좌굴평가식을 제안한 바 있다.²⁾

본 논문에서는 전단하중을 받는 실린더형 헬륨구조물에 대하여 J. Okada 등이 제안한 이론적 접근²⁾을 통해 개발된 좌굴평가식을 검토하고 이를 이용하여 얇은 원통구조물에 대한 좌굴특성을 평가하였다.

좌굴평가식을 살펴보면 먼저 좌굴에 있어서 소성거동(Plasticity)의 영향과 구조물에서 발생 가능한 초기형상결함(Imperfection)의 영향을 고려한 좌굴하중 평가식은 다음과 같이 주어진다.

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

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

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

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

위의 식(2), (3)에서 $Q_{cr,e}^b$ 와 $Q_{cr,e}^s$ 는 이론적 탄성 굽힘좌굴하중과 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 쉘의 반경(R), 두께(t), 길이(L), 탄성계수(E), 0.2% 진응력($\sigma_{0.2}$) 그리고 재료의 포아송비(ν)의 함수로서 해석적으로 결정된다. 액체급속로용 재료, 즉 304SS, 316SS 그리고 Mod.9Cr-1Mo강의 경우에 이러한 계수들은 Ramberg-Osgood형 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 탄성압축좌굴응력¹⁰⁾과 단순 탄성전단좌굴응력¹¹⁾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 결함형태는 좌굴모드와 근사한 결함형상이 가장 심각한 결과를 나타내는 것으로 연구된 바 있다.⁴⁾ J. Okada 등은 유한요소해석법을 이용한 다양한 경우의 수치해석을 통하여 다음과 같은 형상결함 감소계수를 제안하였다.

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

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

위의 설계평가식이 적용될 수 있는 원통형 쉘구조물의 형상범위는 $0.5 < L/R < 5.0$ 그리고 $50.0 < R/t < 500.0$ 이다.

2.2 수치해석에 의한 좌굴특성 평가법

수치해석을 이용한 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.

$$([K] + \lambda[S])\{\Psi\} = 0 \quad (14)$$

여기서 $[K]$ 는 시스템의 강성행렬, $[S]$ 는 응력강성행렬(Stress stiffness matrix), λ 는 좌굴하중을 결정하는 고유치(또는 하중계수) 그리고 $\{\Psi\}$ 는 좌굴모우드를 나타내는 고유벡터를 나타낸다. 이러한 방법은 재료의 비선형성이나 초기 형상결함의 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 좌굴해석 방법은 적용하중 또는 변위를 점차적으로 증가시키는 비선형 정적해석을 수행하여 구조물이 불안정해지는 영역에서의 하중수준을 좌굴하중으로 결정하는 방법이다. 이 방법에는 초기 형상결함, 소성거동, 간극(Gap) 그리고 대변형응답 등을 고려할 수 있으며 따라서 고유치 좌굴해석 방법에 비하여 비교적 정확한 좌굴하중을 산출할 수 있으나 비선형성이 커질수록 해석시간이 길어지는 단점이 있다. 이러한 비선형 좌굴해석은 구조물이 극한하중에 도달하는 점까지 대변형 정적해석을 수행하여 변위와 반력관계에서 나타나는 Snap-through 좌굴특성 곡선으로부터 좌굴하중을 결정하는 방법이다.

3. 세장비에 따른 얇은 원통구조물의 좌굴특성

얇은 원통구조물의 좌굴특성은 가해지는 하중의 위치와 방향, 그리고 구조물의 변위구속조건 등에 따라 크게 달라질 수 있다.^{2),3)} 예를 들어, 원통구조물의 양 끝단이 평행하게 유지되는 경계조건하의 전단하중은 순수 전단좌굴만을 야기하고, 한쪽 끝단이 고정된 조건에서 다른쪽 끝단의 중심에 모멘텀이 작용하면 순수 굽힘좌굴이 발생하며, 한쪽 끝단이 고정된 조건에서 다른쪽 끝단에 임의의 전단하중이 작용하면 원통구조물의 세장비에 따라서 전단좌굴과 굽힘좌굴이 각각 또는 동시에 발생할 수 있다. 실제로 상단지지대를 갖는 원자로 용기를 비롯하여 하단이 지지되는 LNG탱크와 각종 원통구조물 등의 경우는 수평방향의 지진하중에 대해 위의 세번째 경계조건에 해당하며 주어진 구조물의 세장비에 따라서 순수전단, 순수굽힘, 또는 복합좌굴 거동을 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 일반적인 전단하중을 받는 위의 세번째 경계조건하에서 세장비에 따른 좌굴거동 평가를 수행하였다. Fig. 1은 좌굴특성 평가에 사용된 전단하중을 받는 원통구조물의 개념도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 변위가 구속된 상단과 전단하중이 가해지는 하단은 원형을 유지함으로써 변형이 허용되지 않는 강체로 가정하였다.

세장비에 따른 좌굴특성 평가에는 앞의 2.1절에 제시된 식(1)을 사용하였으며 평가에 사용된 재료는 304 스테인레스강이며 상온에서의 탄성계수 $E=190.3\text{GPa}$,

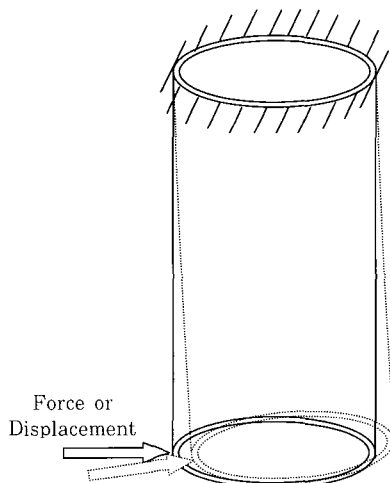


Fig. 1 Cylindrical Structure Subjecting Shear Load

0.2% 진응력 $\sigma_{0.2}=225.6\text{MPa}$ 의 재료상수를 사용하였다.

Fig. 2는 형상비 $R/t=103.0$ (두께 $t=0.5\text{mm}$, 직경 $D=103\text{mm}$)인 얇은 원통구조물에 대하여 세장비 (L/R)의 변화에 따른 좌굴하중의 변화를 위의 좌굴평가식에 의해 계산한 결과이다. 그림에서와 같이 탄성거동만을 고려한 탄성굽힘 좌굴하중 $Q_{cr,e}^b$ 와 탄성전단 좌굴하중 $Q_{cr,e}^s$ 는 세장비가 작아질수록 급격하게 증가함을 알 수 있다. 그리고 세장비가 증가할수록 즉, 원통구조물의 길이가 길어질수록 탄성굽힘 좌굴하중 값이 탄성전단 좌굴하중 값에 접근함으로써, 점차 전단좌굴 특성에서 굽힘좌굴 특성으로 변화함을 나타낸다. 즉, 길이가 길어지면 전단하중에 의해 상단구속부위에 작용하는 굽힘하중이 증가하고, 이러한 굽힘하중은 상단 고정부위에 압축력으로 작용함으로써 굽힘좌굴 특성이 지배적으로 나타나는 결과를 보여준다. Fig. 2의 결과에서 세장비(L/R) 1.6 부근에서는 좌굴하중이 크게 변화하는 천이영역을 나타내고 있으며, 이 영역에서는 전단좌굴과 굽힘좌굴이 동시에 나타나는 복합좌굴 특성이 나타날 수 있다.

소성거동을 고려할 경우 Fig. 2의 결과에서와 같이 좌굴 하중값이 크게 작아지는 것을 알 수 있다. 특히 세장비가 작을수록 소성거동의 영향이 상대적으로 매우 크게 나타남을 알 수 있고, 결론적으로 전단하중을 받는 얇은 원통구조물에 있어서 소성거동이 좌굴하중에 결정적인 영향을 미침을 알 수 있다.

원통구조물의 초기형상결함은 재료특성이 주어질 경우에 Fig. 3과 같이 형상비 R/t 가 증가할수록 식(13)

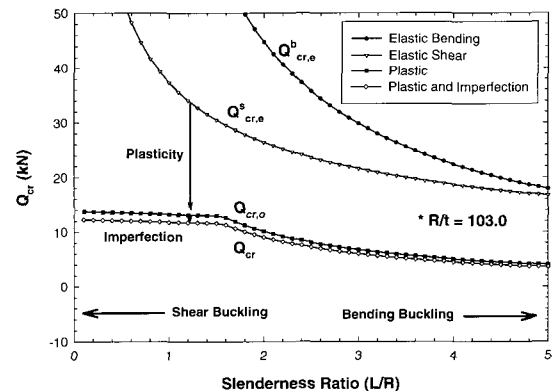


Fig. 2 Results of Buckling Strength Evaluation by Formulae($t=0.5\text{mm}$, $D=103\text{mm}$, $L=103\text{mm}$)

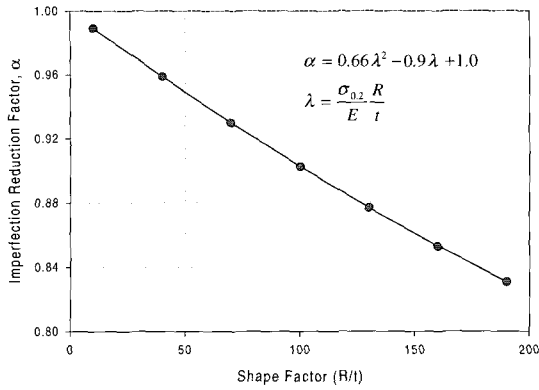


Fig. 3 Shape Factor Effects on Imperfection Reduction Factor in Buckling Formulae

에서 주어진 형상결함 감소계수가 작아짐으로 인해 좌굴 하중값이 작아짐을 알 수 있다. 그러나 Fig. 2의 결과에서와 같이 얇은 원통구조물의 경우 초기형상결함이 좌굴하중 값의 결정에 미치는 영향은 소성영향에 비하여 상대적으로 작게 나타났다.

4. 세장비에 따른 좌굴특성 시험 및 수치해석

4.1 좌굴시험체 설계/제작 및 시험

세장비에 따른 얇은 원통구조물의 좌굴특성을 살펴 보기 위하여 Fig. 2의 평가식에 의한 좌굴특성 평가결과들로부터 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 3가지 좌굴시험체를 결정하였다. Table 1은 결정된 원통구조물 좌굴시험체에 대한 재원을 나타내며 두께와 외경은 모두 동일한 $t=0.5\text{mm}$ 와 $D=103\text{mm}$ 이며 재질은 304스테인레스강이다.

Table 1 Determined 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. 4는 설계, 제작된 좌굴시험체 형상 개념도와 실제 제작되어 반력지지대에 설치된 그림을 나타낸다. 그림에서와 같이 시험체 상단플랜지는 반력지지대에 볼트로 체결되며 상하부 끝단은 변형이 허용되지 않는 강체를 만들기 위하여 원통의 내부와 안쪽에 정밀하게 가공된 두꺼운 보강구조물을 맞댄 다음 서로 볼트로 체결하였다. 상단 고정부에 설치된 보강구조물은 좌굴시험체 고정부에 확실한 변위고정 경계조건을 만족하도록 하기 위한 것이며 하중이 가해질 하부에 장착된 보강구조물은 전단하중 작용시에 하부끝단의 변형을 방지하기 위한 것이다.

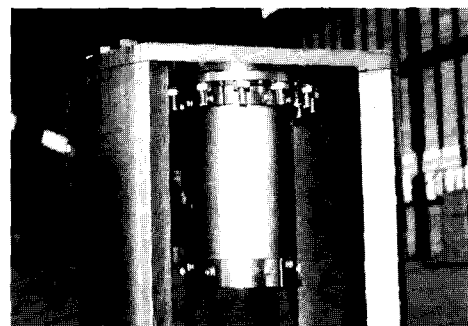
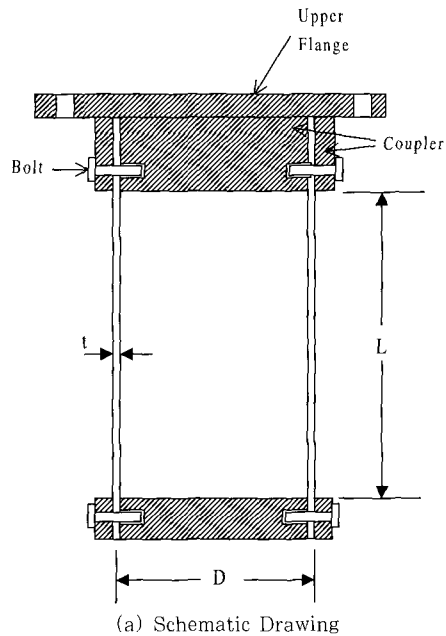


Fig. 4 Schematic Drawing and Photo of Buckling Test Specimen

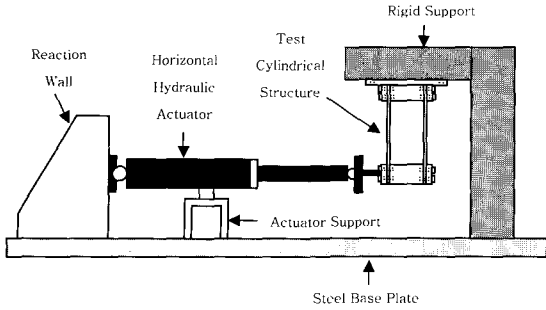


Fig. 5 Schematic Drawing of 1-Directional Buckling Test Facility

Fig. 5는 좌굴특성 시험에 사용된 1축시험장치 개념도를 나타낸 것이다. 시험에 사용된 유압가진기는 최대하중 2.5톤, 최대양정 $\pm 12.5\text{cm}$ 인 독일의 Shenck 사 제품이며 제어기는 Labtronic 8800을 사용하였다. 좌굴시험에는 변위제어 하중을 사용하였으며, 좌굴 특성을 나타내는 변위-반력 곡선을 구하기 위하여 준 정적 변위하중을 약 1.0cm까지 적용하였다. 하중이 가해지는 시험체 하단부와 유압가진기는 안정된 하중 전달을 위하여 연결핀으로 결합시켰다.

4.2 좌굴 수치해석

결정된 원통구조물 좌굴시험체에 대한 좌굴특성을 평가하기 위하여 고유치 좌굴해석과 비선형 탄소성 좌굴 수치해석을 수행하였다. 좌굴 수치해석을 위해 ANSYS 유한요소 상용프로그램¹²⁾을 사용하였으며 프로그램에서 제공하는 소성대변형률 요소인 4절점 SHELL43요소를 사용하였다. 해석에 사용된 상온에서의 재료상수는 탄성계수 $E=194\text{GPa}$, 포아송비 $\nu=0.29$, 밀도 $\rho=7800\text{kg/m}^3$ 이며 비선형 탄소성 해석에 사용된 재료의 응력-변형률 곡선은 Fig. 6과 같다.

4.3 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. 7과 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. 8은 Model-A 시험체에 대한 변위-반력

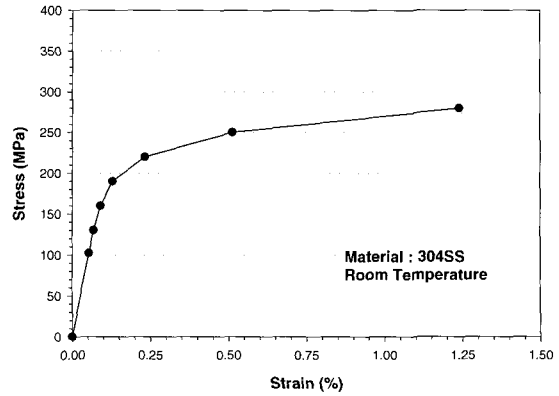


Fig. 6 Stress-Strain Curve Used in Nonlinear Elastic-Plastic Buckling Analysis

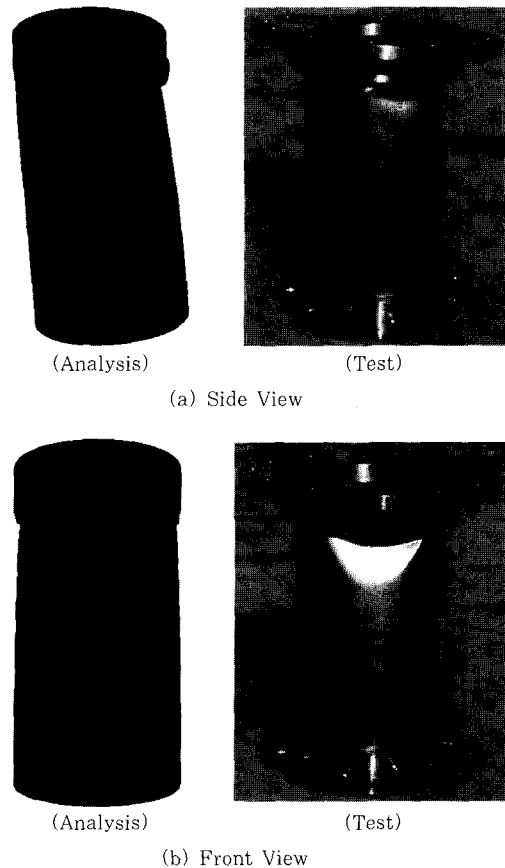


Fig. 7 Buckling Shape of Mode-A Specimen

곡선 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 시험에 의한 좌굴하중은 약 $Q_{cr}=7.6\text{kN}$, 평가식은 $Q_{cr}=6\text{kN}$, 수치해

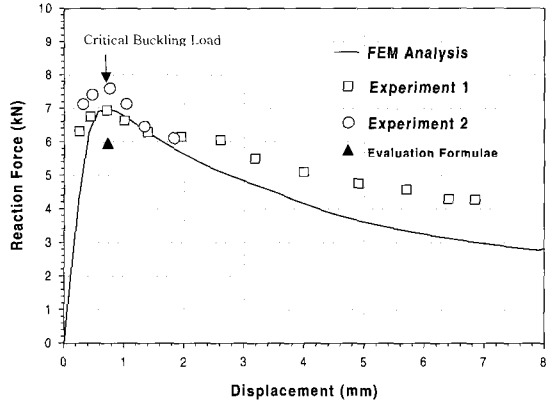


Fig. 8 Load-Displacement Curves for Model-A Specimen

석은 $Q_{cr}=7\text{kN}$ 으로서 평가식과 수치해석에 의한 좌굴 하중 예측 결과가 시험결과와 매우 근접하며, 특히 수치해석에 의한 변위-변력 곡선이 시험결과와 잘 일치한다.

다음으로 굽힘과 전단좌굴 특성이 함께 나타날 수 있는 세장비 $L/R=1.6$ 을 갖는 Model-B 시험체에 대한 좌굴형상 시험 및 해석결과는 Fig. 9와 같다. 좌굴 평가식에서 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 하중작용 방향에 대해 측면 및 정면도에서 살펴보면 잘 일치한다. Fig. 10은 Model-B 시험체에 대한 변위-반력 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 시험에 의한 좌굴하중은 약 $Q_{cr}=12\text{kN}$, 평가식은 $Q_{cr}=10.8\text{kN}$, 수치해석은 $Q_{cr}=11\text{kN}$ 으로서 평가식과 수치해석에 의한 좌굴하중 예측 결과는 모두 시험결과에 비해 약간 작으면서도 매우 근사하게 나타났다.

전단좌굴 특성이 지배적으로 나타날 수 있는 세장비 $L/R=1.0$ 인 Model-C 시험체에 대한 좌굴형상 시험 및 해석결과는 Fig. 11과 같다. 그림에서와 같이 시험 및 해석결과 모두에서 전단 좌굴특성이 지배적으로 나타났으나 하중이 가해지는 지점의 반대편 상부 지지점 부위에서 약간의 굽힘좌굴 형상이 함께 나타났다. Fig. 11 (b)의 정면도를 보면 좌굴형상에 대한 수치해석 결과와 시험결과가 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 12는 변위-반력 곡선을 나타낸 것으로 시험에 의한 좌굴하중은 약 $Q_{cr}=17.5\text{kN}$, 평가식은 $Q_{cr}=11\text{kN}$, 수치해

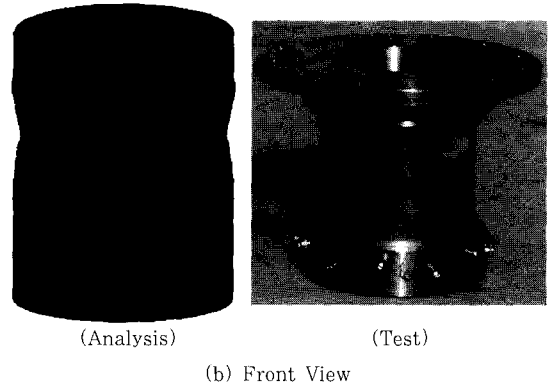
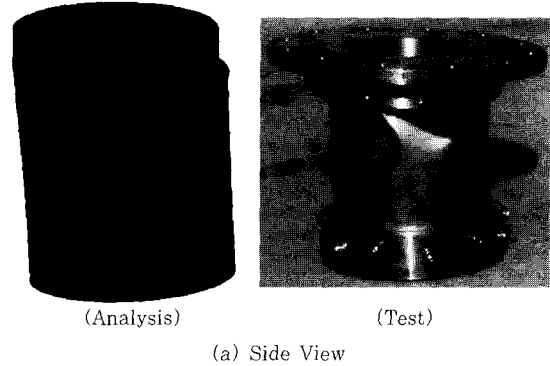


Fig. 9 Buckling Shape of Model-B Specimen

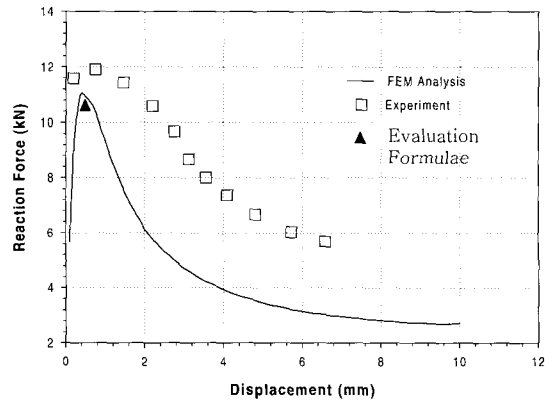


Fig. 10 Load-Displacement Curves for Model-B Specimen

석은 $Q_{cr}=12.2\text{kN}$ 으로서 시험결과가 평가식 및 수치해석 결과에 비해 약간 크게 나타났다.

Fig. 8, Fig. 10, Fig. 12의 좌굴하중에 대한 결과로부터 평가식과 수치해석에 의한 좌굴하중 평가결과

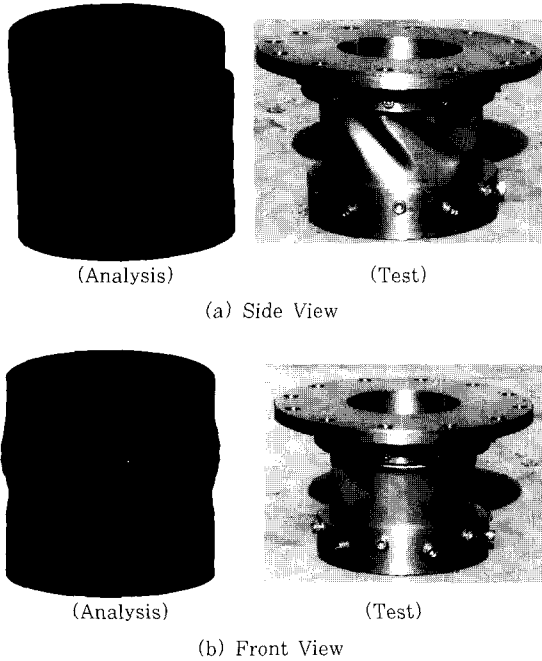


Fig. 11 Buckling Shape of Model-C Specimen

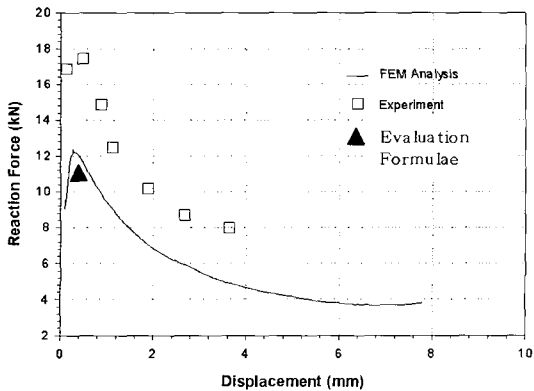


Fig. 12 Load-Displacement Curves for Model-C Specimen

는 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 제시 될 수 있다.

Fig. 13은 세장비에 따른 좌굴하중 평가결과들에 대한 종합적인 내용을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 고유치 좌굴 수치해석에 의한 좌굴하중 계산값들은 평

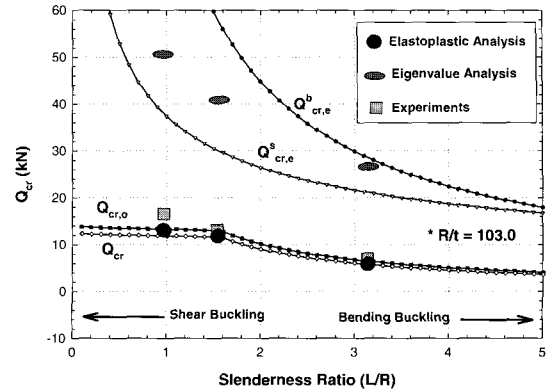


Fig. 13 Comparison of Buckling Strength Values Corresponding to Slenderness Ratio by Formulae, Analyses and Tests

가식에 의한 탄성좌굴하중 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.

6. 결 론

본 논문에서 수행한 전단하중을 받는 얇은 원통구조물의 세장비에 따른 좌굴특성 평가 및 시험결과에서 다음과 같은 결론들을 얻었다.

- 전단하중을 받는 얇은 원통구조물에서 세장비 $L/R=3$ 이상인 경우에는 순수 굽힘좌굴, 세장비 $L/R=1$ 이하인 경우에는 순수 전단좌굴이 지배적으로 나타나고 세장비 $L/R=1.6$ 영역에서는 전단좌굴과 굽힘좌굴이 동시에 나타나는 복합 좌굴특성을 갖는다.
- 전단하중을 받는 얇은 원통구조물의 좌굴하중은 소성거동에 크게 영향을 받으며 설계 좌굴하중 결정에는 비선형 탄소성 좌굴 수치 해석방법이 요구된다.
- 본 논문에서 사용한 좌굴평가식과 비선형 탄소성 해

석방법은 모두 시험값에 비해 하한계 값을 나타냈으며 보수적 좌굴설계 관점에서 최소 보수성을 갖고 정확히 좌굴하중을 결정할 수 있는 방법으로 제시될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

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, 1995, pp. 65~79
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, 1996, pp.111~141
4. T. Murakami, et al, "The Effects of Geometrical Imperfection on Shear Buckling Strength of Cylindrical Shells," *Proc. SMiRT-II*, 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, 2001, pp.321~330
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, 1985
8. RCC-MR, Appendix 7, Analyses taking Account of Buckling, 1985
9. H. Akiyama, H. Phtsubo, etc., "Outline of the Seismic Buckling Design Guideline for FBR - Tentative Draft," SMiRT-11 Conference, E09/1, 1991, pp.239~250
10. S. P. Timoshenko et al., Theory of Elastic Stability, *McGraw-Hill*, 2nd edn, 1961
11. N. Yamaki, Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells, North-Holland Series in Applied Math. And Mech, 1984
12. ANSYS User's Manual for Revision 5.1, Volume I,II,III