

수압을 받는 원환보강원통의 최종강도에 대한 초기 형상결함과 잔류응력의 영향

조 상래 · 김 승민
울산대학교 수송시스템공학부

Effect of Initial Shape Imperfection and Residual Stress on the Ultimate Strength of Ring-Stiffened Cylinders under Hydrostatic Pressure

Sang-Rai CHO and Seong-Min KIM

School of Transportation Systems Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

KEY WORDS: Ring-stiffened cylinder 원환보강원통, Ultimate strength 최종강도, Hydrostatic pressure 수압, Initial shape imperfection 초기형상결함, Residual stress 잔류응력

ABSTRACT: Ring-stiffened cylinders are widely used as the pressure hull of submarines and underwater vehicles. For large ring-stiffened cylinders cylindrical shells are fabricated by cold rolling of flat plates and then welding of curved shells. After forming cylinders ring-stiffeners are welded on to the cylinders. Due to these cold rolling and welding initial shape imperfections and residual stresses exists in fabricated ring-stiffened cylinders. It is well known that the initial shape and material imperfections affect the ultimate strength of ring-stiffened cylinders significantly.

In this paper previous researches on the effects of initial shape imperfections and residual stresses are briefly reviewed. Recently a numerical analysis computer program was developed to predict the ultimate strength of ring-stiffened cylinders subjected to hydrostatic pressure, which is based on the Dynamic Relaxation technique. This program was employed to numerically investigate those effects. The numerical predictions were substantiated with relevant experimental results.

1. 서 론

원환보강원통은 수중함이나 심해잠수정의 내압구조로 많이 사용되고 있다. 이런 내압구조물은 대부분 붕괴강도(붕괴강도)를 기준으로 설계되고 있어 이의 최종강도를 정확히 추정할 수 있어야 한다. 소형의 원환보강원통은 기계가공에 의해 제작되는 경우도 있으나 대부분은 평판을 상온에서 굽힘가공하여 원통을 만들고 원환보강재를 용접하여 제작하게 된다. 이런 과정을 통해 제작된 원환보강원통에는 초기 형상결함과 잔류응력이 발생하게 되고 이들은 원환보강원통의 최종강도에 큰 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 초기 형상결함과 잔류응력이 붕괴강도에 미치는 영향과 관련된 이전 연구를 간략히 정리하고, 초기형상결함의 표현방법, 잔류응력의 형태와 크기를 결정할 수 있는 참고 문헌을 조사하였다. 또한 최근 개발된 원환보강원통의 최종강도 해석프로그램[1]을 사용하여 초기 형상결함과 잔류응력이 원환보강원통의 붕괴강도에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구에서 해석 대상으로 채택한 원환보강원통은 최근 수행된 실험 모형[2]으로 실제 구조물의 1/10 정도의 크기이다.

2. 이전의 관련 연구

1956년 Donnell은 비보강원통의 초기형상을 제작방법에 의해 값이 정해지는 결함계수(unevenness factor)의 함수로 가정하여 유한차집이론을 사용하여 초기 결함과 붕괴강도의 관계를 제안하였다[3]. Homma와 Ishida는[4] 초기 형상결함이 수압을 받는 비보강원통의 붕괴강도에 미치는 영향에 관한 실험과 이론연구를 수행하였다. 실험 모형은 기계가공하여 제작하고 인위적으로 손상은 주어 초기형상결함을 만들었다. 실험결과는 유한요소법을 사용한 추정값과 비교되었다. 실험과 이론연구의 결과로부터 초기형상결함의 크기가 원통두께의 절반일 때 thickness계수가 0.7-1.0 범위에서는 붕괴강도가 30-40% 저감되고 thickness계수가 2.0이상이면 초기형상결함의 영향은 무시할 수 있다고 밝혔다. thickness 계수는 $(\frac{l}{t})^{1/2}(\frac{2\gamma}{t})^{1/4}(\frac{\sigma_Y}{E})^{1/2}$ 로 정의한 것이다.

Kendrick은 참고문헌 5에서 초기형상결함을 계측하는 두가지 방법에 대한 정확도를 비교하였다. 소형모형의 계측에 적합한 반지름계측법(radial measurement method)과 대형의 실제 구조물의 계측에 사용되는 코드계측법(chord gauge method)을 동일한 모형에 적용하고 그 정확도를 비교하여 코드계측법의 유용성을 확인하였다. Smith와 Kirkwood는 초기형상결함과 잔류

응력이 원환보강원통의 전체좌굴붕괴(overall buckling collapse)에 미치는 영향을 수치해석을 통해 검토하였다[6,7]. 이 연구 결과에 의하면 초기형상결함이 BS5500[8]의 허용한계인 반지름의 0.5%인 경우 강도저하는 32%가 되고 잔류응력에 의한 강도저하는 43%가 된다.

Bushnell은 BOSOR5 컴퓨터 프로그램을 사용하여 냉간 굽힘과 용접에 의한 잔류응력을 추정하고 추정된 잔류응력이 원환보강원통의 붕괴강도에 미치는 영향을 검토하였다[9]. 용접에 의한 잔류응력은 용접부를 -700°C로 냉각시켜 열응력해석을 수행하였다.

Cho와 Frieze[10]는 용접으로 제작된 원환보강원통과 용접으로 제작된 후 열처리를 하여 잔류응력을 제거한 원환보강원통의 붕괴강도를 비교하여 잔류응력에 의한 강도의 저하가 평균 33% 정도가 됨을 밝혔다. 박치모[11]는 수치해석을 통해 초기형상결함이 보강원통의 붕괴강도에 미치는 영향을 검토하였는데 규정에서 허용하는 수준의 초기형상결함을 갖는 경우 강도는 45%까지 감소됨을 밝혔다.

3. 초기 형상결함의 수식화

실험 모형의 강도를 수치해석으로 추정할 때 필요한 것이 초기 형상의 수식화이다. 이는 유한요소법으로 해석할 때의 절점과 제측된 점이 일치하지 않기 때문이다. 원주방향으로 측정 위치의 개수를 N개 그리고 높이방향으로의 측정 위치를 M개라 하면 총 N x M 개의 측정값을 얻게 된다. 이 측정치를 사용하여 원통의 표면을 나타내는 수식을 유도하여야 하는데 이를 위해서는 다음의 수식을 사용할 수 있다.

$$w_i(\theta, x) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (a_{nm} \cos n\theta + b_{nm} \sin n\theta) \sin(m\pi x/L) \quad (1)$$

여기에서

$w_i(\theta, x)$ 는 원주각이 θ 이고 원통의 높이가 x 인 곳의 초기변형

n 는 원주방향 cosine파와 sine파의 개수

m 은 높이방향 sine파의 개수

L 은 원통의 높이

이 식에 초기변형의 측정값을 사용하여 Fourier 급수 해석을 하면 a_{nm} 과 b_{nm} 을 결정할 수 있다. 실험 모형의 초기변형 측정 결과를 사용하여 계산해본 바 n 은 $N/2$ 일 때 가장 정확한 값을 얻을 수 있었다. 모형의 형상이 수식화되면, 즉 a_{nm} 과 b_{nm} 이 결정되면 해석을 위한 절점에서의 좌표는 식(1)을 사용하여 결정할 수 있다.

Fig. 1에는 모형 RS-4의 초기형상 측정값과 Fourier 급수로 표현한 값을 비교하여 근사식의 정확도를 보여주고 있다. 이 그림에서의 점은 측정한 값이며 실선은 Fourier 급수로 근사화한 것인데 진원에서 벗어난 정도를 10배 증폭시켜 그린 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 수식으로 근사화한 경우 약간의

오차는 보이지만 대체적으로 원통의 형상을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 이렇게 원통의 형상이 수식화되면 유한요소법으로 수치해석을 하는 경우 절점의 초기 좌표값으로 손쉽게 입력자료를 만들 수 있다.

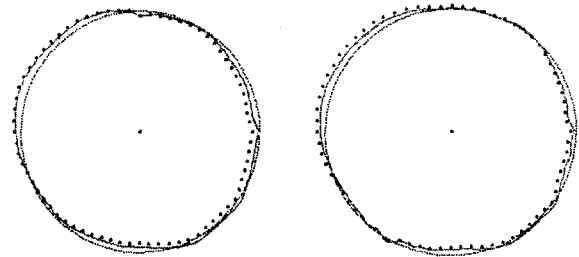


Fig. 4(a) Measured initial shape imperfection plots together with fourier series approximations : model RS-4

4. 잔류응력

원환보강원통의 제작과정에서 발생하는 잔류응력은 원통의 최종강도에 많은 영향을 미칠 수 있다. 이에겐 평판을 굽혀 원통형 셸로 만드는 냉간 굽힘과정에서 발생하는 원주방향의 잔류응력과 보강재와 원통셸의 용접과정에서 발생하는 원주방향의 잔류응력이 보강원통의 구조거동에 가장 많은 영향을 미친다. 이외에도 원통셸의 길이방향의 용접에 의한 잔류응력도 발생할 수 있다. 이를 다시 정리하면 다음과 같다.

- circumferential residual stress due to cold rolling of the shell
- circumferential residual stress due to stiffener-shell toe welding
- longitudinal residual stress due to longitudinal shell welding

4.1 굽힘작업에 의한 잔류응력

굽힘작업이 한번의 가공에 의해 이루어진다면 이로 인한 응력분포의 원통셸의 두께방향의 분포는 쉽게 구할 수 있다. 하지만 통상 몇 차례의 굽힘가공을 거치게 되면 이의 분포는 보다 복잡해지게 되는데 참고문헌 3에는 이에 대한 실험연구의 결과가 제공되어 있다.

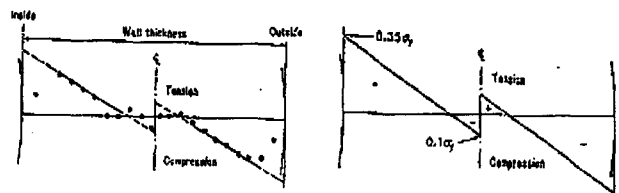


Fig. 2 Hoop residual stress pattern due to cold rolling

Fig. 2에는 잔류응력의 분포를 보여주고 있는데 이 그림에

서 알 수 있듯이 잔류응력 분포의 형상은 한번의 가공에 의한 결과와 유사하다. 하지만 잔류응력의 극치는 보다 완화된 값을 보여주고 있다. 원통셸의 최내측에는 인장응력이 그리고 최외측에는 압축응력이 항복응력의 35% 정도의 수준이다. 또한 셸의 중립면 가까이에서는 항복응력의 10% 정도가 된다.

4.2 원환보강재와 원통셸의 용접에 의한 잔류응력
원환보강재와 원통셸의 용접에 의한 잔류응력의 분포형상을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 이 용접으로 인한 영향 중에서 용접선을 따라가는 방향의 수축과 용접선을 가로지르는 방향으로 원통셸의 변형으로 인해 추가되는 수축이 가장 구조거동에 많은 영향을 미치게 된다. 용접선을 따라가는 방향의 수축으로 인한 보강재 사이 원통셸의 잔류응력은 다음의 식(2)로 추정할 수 있다.

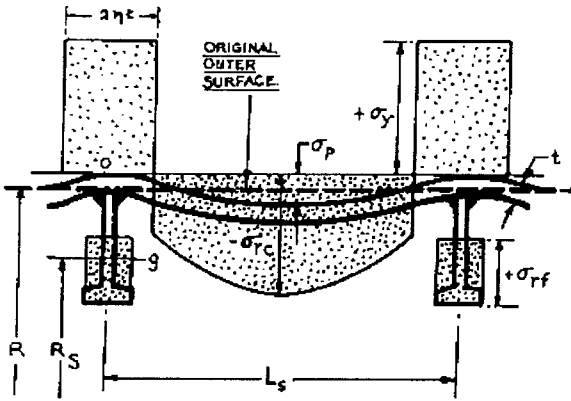


Fig. 3 Hoop residual stress due to stiffener-shell toe welding

$$\frac{\sigma_{rc1}}{\sigma_Y} = (2 + \tau^2) \frac{\eta}{(L_s/t)(1 + \zeta) - \eta(2 + \tau^2)} \quad (2)$$

여기에서

σ_{rc1} 은 용접선 방향의 수축에 의한 보강재사이 원통셸에 발생하는 잔류응력

$$\tau = t_w / t$$

t_w 는 보강재 웨브의 두께

$$\zeta = A_s / (L_s t)$$

A_s 는 보강재의 단면적

tension block의 폭을 나타내는 η 는 다음의 식에 의해 결정할 수 있는데 이는 Dwight와 Moxham[13]에 의해 제안된 식이다.

$$\eta t = 96 \frac{QE\alpha}{v\sigma_Y} \quad (3)$$

여기에서

Q 는 단위 시간당 열투입량(heat input per unit time),
단위는 watts

α 는 재료의 열팽창계수, 단위는 $mm/C^\circ mm$

v 는 열원의 진행속도, 단위는 mm/s

그리고 용접선을 가로지르는 방향으로의 수축에 의한 보강재 사이 원통셸의 잔류응력은 다음의 식으로 결정할 수 있다.

$$\sigma_{rc2} = \sigma_{rf} - \delta_p E/R \quad (4)$$

여기에서

$$\sigma_{rf} = (2\delta_p E / \pi R) / (1 + A/tL_s)$$

δ_p 는 보강재 사이의 평균변형치로 대략 원통셸 두께의 10% 정도

$$A = A_s (R/R_s)^2$$

따라서 용접으로 인한 전체 잔류응력은 다음의 식으로 결정할 수 있다.

$$\sigma_{rc} = \sigma_{rc1} + \sigma_{rc2} \quad (5)$$

4.3 원통셸의 길이 방향 용접으로 인한 잔류응력

원통셸을 집합하기 위해 길이방향으로 용접을 하면 Fig. 8과 같은 형상의 잔류응력이 길이 방향으로 발생하게 된다. 하지만 이의 영향은 그리 크지 않은 것으로 알려져 있다.

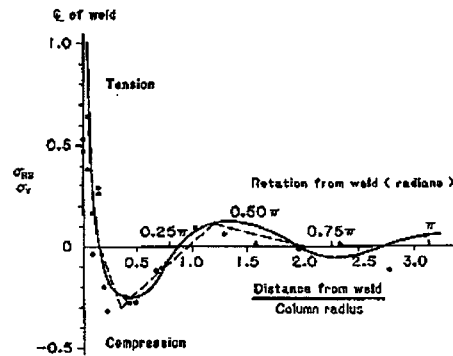


Fig. 4 Longitudinal residual stress distribution due to seam welding

5. 초기형상결합과 잔류응력의 영향

초기 형상결합과 잔류응력의 영향을 검토하기 위해 사용한 수치해석 프로그램인 ULSSU는 DR(Dynamic Relaxation)기법을 사용하여 작성한 것으로 이에 관한 자세한 설명은 참고문헌 1에 주어져 있다.

5.1 사용 프로그램의 검증

ULSSU의 정확도와 신뢰성의 검증을 위해 최근 수행된 4개의 실험 결과를 사용하였다. 이 실험에 관한 자세한 자료는 참고문헌 2에 수록되어 있다. Table 1에는 붕괴압력의 실험값, ULSSU의 추정값 그리고 BS5500의 추정값이 비교되어 있다. 이 표에서 알 수 있듯이 ULSSU의 추정값은 실험값과 비교할 때 12%의 범위에 있고 BS5500과 비교한 경우도 비슷한 범위에 들고 있음을 알 수 있다. Fig. 5에는 모형 RS-4에 대한 수압의 크기별 변형 형상을 보여주고 있다.

Table 1. Predictions of collapse pressure for test models using program ULSSU

(unit: N/mm²)

| Model | exp. | ULSSU | BS5500. | $\frac{\text{exp.}}{\text{ULSSU}}$ | $\frac{\text{BS5500}}{\text{ULSSU}}$ |
|-------|-------|-------|---------|------------------------------------|--------------------------------------|
| RS-4 | 1.844 | 1.800 | 2.000 | 1.024 | 1.111 |
| RS-5 | 1.815 | 1.650 | 1.760 | 1.100 | 1.067 |
| RS-6 | 2.119 | 2.330 | 2.047 | 0.909 | 0.879 |
| RS-7 | 1.746 | 1.980 | 1.772 | 0.882 | 0.895 |

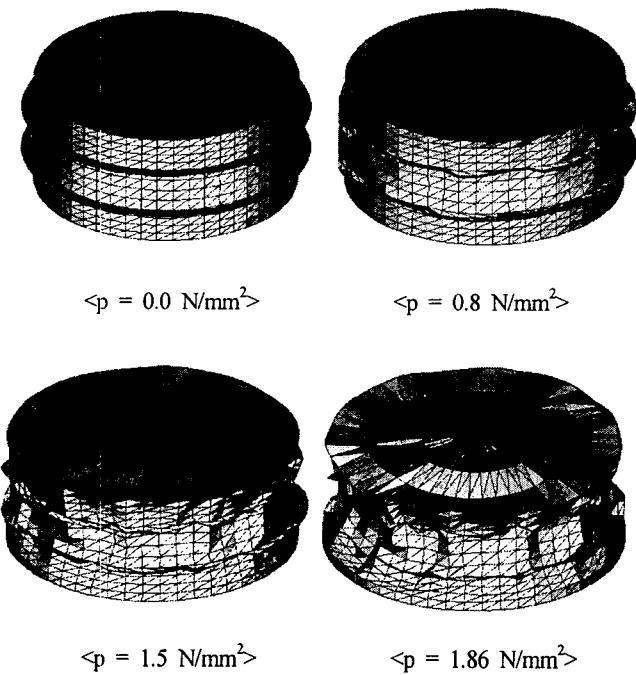


Fig. 5 Deformed shape of model RS-4 obtained by analysis

5.2 초기 형상결함의 영향

초기 형상결함이 수압을 받는 원환보강원통의 최종강도에 미치는 영향을 조사하기 위해 모형 RS-4의 예측된 초기 형상결함을 기준으로 형상결함의 크기를 변화시킨 4가지 경우에 대해 최종강도를 계산하였다. 이 때의 잔류응력은 판의 냉간굽힘과 보강재의 용접에 의한 것을 모두 고려하였다.

Table 2에는 초기 형상결함이 없는 경우, 예측된 형상결함의 크기를 0.5배, 1배, 2배로 변화시킨 경우의 붕괴압력을 보여주고 있다. 이 표에서 알 수 있듯이 예측된 그대로의 초기 형상결함이 있으면 형상결함이 없는 완전한 형상을 갖는 원통에 비해 강도는 7.2% 떨어지게 되고, 형상결함이 50%와 200%가 되면 강도의 저하는 각각 2.1%와 27.8%가 된다.

Table 2. Effects of initial shape imperfection on the ultimate strength of ring-stiffened cylinders under hydrostatic pressure

| Amplitude of initial shape imperfection | Collapse pressure(N/mm ²) | Loss of strength due to initial shape imperfection |
|---|---------------------------------------|--|
| no imperfection | 1.940 | - |
| half of measured values | 1.900 | 2.1 % |
| as measured | 1.800 | 7.2 % |
| twice of measured values | 1.400 | 27.8 % |

5.3 잔류응력의 영향

제작과정에서 발생하는 잔류응력이 수압을 받는 원환보강원통의 최종강도에 미치는 영향을 조사하기 위해 모형 RS-4에 대해 잔류응력이 없는 경우, 판의 냉간굽힘에 의한 잔류응력만 있는 경우, 보강재의 용접에 의한 잔류응력이 있는 경우 그리고 두가지의 잔류응력이 모두 있는 경우에 대해 최종강도를 계산하였다.

Table 3. Effects of residual stresses on the ultimate strength of ring-stiffened cylinders under hydrostatic pressure

| Residual stress | Collapse pressure(N/mm ²) | Loss of strength due to residual stress |
|--|---------------------------------------|---|
| without residual stress | 1.820 | - |
| residual stress due to cold bending of shell | 1.840 | -1.1% |
| residual stress due to welding of stiffeners | 1.940 | -6.6% |
| residual stress due to both cold bending and welding | 1.800 | 1.1% |

이 표에서 알 수 있듯이 원통판의 냉간굽힘에 의한 잔류응력은 보강원통의 최종강도를 오히려 1.1% 증가시키고, 보강재의 용접에 의한 것은 최종강도를 6.6% 증가시키고 있다. 두 가지 잔류응력을 모두 고려하게 되면 최종강도는 잔류응력이 없는 경우에 대해 1.1% 감소하게 된다 이에 대해서는 추가검토가 필요하다.

6. 결론

본 논문에서는 수압을 받는 원환보강원통의 최종강도에 미

치는 초기형상결함과 잔류응력의 영향을 수치해석을 통해 조사하였다. 기존의 연구에서도 밝혀졌듯이 이의 영향은 정확한 붕괴강도의 추정을 위해서는 반드시 고려하여야 하고 이들의 처리에 대한 합리적인 방법이 모색되어야 한다고 판단된다. 지금까지 대부분의 연구에서는 초기 형상결함을 탄성좌굴 모드 가정하고 이의 진폭을 관련 규정의 허용값을 기준으로 처리하였다. 하지만 관련 규정에서는 최대 진원도(out-of-circularity)를 반지름의 0.5%로 제한하고 있는데 이 값이 탄성좌굴 모드의 진폭을 의미하는 것은 아니다. 따라서 이의 관계에 대한 추가 연구가 필요하다. 본 연구에서 고려한 잔류응력은 참고문헌에 주어진 자료를 사용하였는데 이에 관한 추가연구 역시 필요하다고 판단된다. 본 논문에는 한 개의 모형에 대한 수치해석 결과만은 포함하고 있는데 보다 많은 모형에 대한 계산을 수행하고 이의 경향에 대한 분석연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] 조상래, 김승민, 김두기, 조윤식 'DR기법을 이용한 수압을 받는 원환보강원통의 최종강도 수치해석', 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, 삼성중공업, 거제, pp 328-333, 2001.
- [2] 조상래, 김승민 '원환보강원통의 최종강도 실험연구', 대한조선학회 추계학술대회 논문집, 울산대, 울산, pp 314-319, 2000.
- [3] Donnell, L. H. 'Effect of imperfections on buckling of thin cylinders under external pressure', Jour. of Applied Mechanics, vol. 23, 569-575, 1956.
- [4] Homma, Y. and Ishida, S. 'Shell buckling of circular cylindrical shells with initial deflection', Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, vol. 158, pp 395-405, 1985.
- [5] Kendrick, S. B. 'Shape imperfections in cylinders and spheres: their importance in design and methods of measurement', Jour. of Strain Analysis, vol. 12, no. 2, pp 117-122, 1977.
- [6] Smith, C. S. and Kirkwood, W. 'Influence of initial deformations and residual stresses on inelastic flexural buckling of stiffened plates and shells', in Steel Plated Structures, eds. Dowling, P. J., Harding, J. E. and Frieze, P. A., Crosby Lockwood Staples, London, pp. 838-864, 1977.
- [7] Smith, C. S. 'Imperfection effects and design tolerances in ships and offshore structures', Institute of Engineers and Shipbuilders in Scotland, paper no. 1434, 1981.
- [8] BS 5500, 'Specification for unfired fusion welded pressure vessels', British Standards Institution, with modification, 1976.
- [9] Bushnell, D. 'Effect of cold bending and welding on buckling of ring-stiffened cylinders', Computers & Structures, vol. 12, pp 291-307, 1980.
- [10] Cho, S.-R. and Frieze, P. A. 'Strength formulation for ring-stiffened cylinder under combined axial loading and radial pressure', Jour. of Constructional Steel Research, vol. 9, pp 3-34, 1988.
- [11] 박 치모 '원환으로 보강된 원통형 셸의 최종강도 해석', 서울대학교 조선공학과 박사학위 논문, 1990.
- [12] Chen, W. F. and Ross, D. A. 'Test of fabricated tubular columns', Jour. of the Structural Division, ASCE, vol. 103(ST3), Proc. Paper 12809, pp 619-634, 1977.
- [13] J. B. Dwight and K. E. Moxham, Welded steel plates in compression, The Structural Engineer, Vol. 47, Cambridge, 1969, pp49-66.