

# 상용소프트웨어를 이용한 원환보강 원통의 최종강도 해석(II)

박치모, 이승훈  
울산대학교 수송시스템공학부

## Ultimate Strength Analysis of Ring-stiffened Cylinders Using Commercial Softwares(II)

Chi-Mo Park, Seung-Hoon Lee  
School of Transportation systems engineering, University of Ulsan

**KEY WORDS:** Ring-stiffened cylinder 원환보강 원통, Ultimate strength analysis 최종강도해석, Initial imperfection 초기결함, Commercial softwares 상용소프트웨어

**ABSTRACT:** Despite the frequent use of ring-stiffened cylinders as a submarine pressure hull or members of various types of offshore structures, their ultimate strength analysis methods have not been well established because of their complex structural characteristics. This paper has established the method how to use commercial softwares based on the finite element method to implement the ultimate strength analysis of ring-stiffened cylinders covering both types of initial imperfections, i. e. initial deformation and initial stress by combining two separately offered functions of common commercial finite element softwares, linear elastic buckling analysis and nonlinear stress analysis. Developed method was applied to one of the world-widely used commercial softwares, ABAQUS for the analysis of ring-stiffened cylinders. This paper ends with some useful information about the imperfection sensitivity of ultimate strength of ring-stiffened cylinders.

### 1. 서론

잠수함의 주 선각이나 각종 해양구조물의 주요 구조부재로 널리 사용되어 오고 있는 원환보강 원통구조는 최근 잠수함의 국내 건조가 활발해지면서 최적의 구조설계를 위해 그 최종강도의 정확한 추정이 더욱 절실히 요구되고 있으나 이론적인 접근이 어려워 전적으로 경험식[1]에 의존하고 있는 실정이다. 최근 조 등[2]은 다양한 실험모델을 직접 제작하여 초기변형을 계측한 뒤 이를 압력용기에 설치하고 유체정수압 하에서의 최종강도 실험을 수행한 바 있고, 박 등[3]은 세계적으로 널리 사용되는 상용 유한요소 프로그램 중 MSC/NASTRAN, ABAQUS 두 가지를 이용하여 이들 실험모델에 대해 초기결함 중 초기변형만을 고려한 최종강도 해석을 수행하고 이들 결과를 비교 검토하여 최종강도 해석의 경우 ABAQUS 가 MSC/NASTRAN 보다 좋은 결과를 준다는 결론을 내린 바 있다. 이러한 연구의 연장선상에서 본 논문에서는 초기변형에 초기결함까지 고려한 최종강도 해석을 수행하고 또한 초기결함도 실제 계측된 그대로의 초기결함과 흔히 사용하는 좌굴모우드로 가정된 초기결함을 별도로 고려하고 이들 결과를 비교 고찰하는 등의 연구를 통해 초기결함을 고려하는 최종강도 해석법을 정립하는데 일조하고자 하였다. 앞서 언급한 두 상용 소프트웨어 중 ABAQUS 가

최종강도 해석에 유리하다는 판단도 있는데다가 또한 ABAQUS[4] 만이 초기응력을 포함시키는 기능을 가지고 있어 본 해석에는 ABAQUS 만을 사용하였다. 앞서 언급한 조 등[2]의 실험모델 여러 개를 대상으로 최종강도 해석을 수행하고 여러 가지 유용한 결론을 도출하였다.

### 2. 초기결함을 고려한 최종강도 해석법

좌굴에 민감한 구조물의 최종강도해석을 수행하기 위해서는 흔히 초기결함법(Imperfection method)이 사용되는데 본 논문에서는 선형 탄성좌굴해석과 비선형 응력해석을 별도의 기능으로 지원하는 상용 유한요소해석 프로그램을 활용하여 원환보강 원통의 최종강도해석을 수행하기 위해 다음과 같은 계산전략을 수립하였다.

- 1) 원환보강 원통에 대해 유한요소 모델링을 수행한다.
- 2) 유한요소 모델에 대한 선형탄성 좌굴해석을 수행하여 좌굴모우드를 구한다.
- 3) 좌굴모우드에 적절한 Scaling factor를 곱함으로써 진폭을 조정된 뒤 이를 비선형 해석의 초기변형 값으로 부여한다.
- 4) 인장 항복응력과 압축응력이 자체평형을 만족하도록 분포된 초기응력을 부여한다.
- 5) 위의 모델에 대해 비선형 응력해석을 수행한다.

### 3. 초기응력의 분포

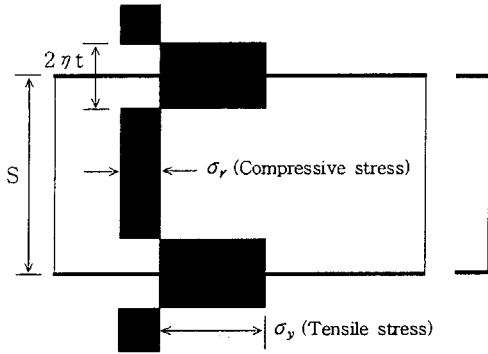


Fig.1 Distribution of residual stress due to welding

원환보강 원통에 존재하는 초기응력은 제작과정에 따라 다양한 분포를 가질 수 있으나[5] 우선 원환보강재를 원통에 부착하는 과정에서 발생하는 다음과 같은 잔류응력만을 고려하기로 한다. 보강재가 부착된 판에는 용접으로 인해 Fig.1에 보인 바와 같은 잔류응력이 발생하게 된다. 즉, 보강재 부착 부위의 열 영향부에는 용접에 의한 온도상승으로 소성변형 상태까지 팽창하였다가 냉각되면서 수축하려고 하지만 주위의 구속작용으로 수축하지 못하고 항복응력 크기의 인장을 받게 된다. 한편 판의 중앙부에는 이와 평형을 유지하는 압축 잔류응력  $\sigma_r$  가 발생된다. 여기서  $\eta t$  가 인장 항복응력의 폭이고  $s$  가 원환보강재 간격이라고 하면 압축 잔류응력  $\sigma_r$  는 평형조건으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\sigma_r = \frac{2\eta}{\frac{s}{t} - 2\eta} \sigma_y \quad (1)$$

실험결과  $\eta$  는 3~6 정도인 것으로 밝혀져 있다[6].

### 4. Single-bay 모델의 최종강도 해석 예

초기응력을 고려한 최종강도해석을 수행하려면 원환보강재 근처 좁은 폭의 판에 인장 항복응력을 부여해야 하는데 이를 위해서는 요소 길이가 이 폭을 넘지 않을 정도의 섬세한 요소분할이 요구된다. 이와같은 섬세한 요소분할로 원환보강 원통 전체를 모델링할 경우 요소수가 너무 많아 엄청난 계산시간이 요구되므로 먼저 초기단계로서 양단 단순지지 조건의 Single bay model 에 대하여 초기응력을 고려한 최종강도해석을 수행하고자 한다. 해석 모델의 치수는 Length: 80mm, Radius: 275mm, Thickness: 2.21mm 이고 재료의 탄성계수 및 항복응력은 각각  $E=216,000\text{N/mm}^2$ ,  $\sigma_y=276.4\text{N/mm}^2$  이다. Fig.2 는 Single bay 에 대한 유한요소모델로서 길이방향 요소수 8개 원주

방향 요소수 172개이다. 이와같이 구성된 모델에 대한 최종강도 해석결과는 Table1과 Fig.3에 나타내었다. Table 1으로 부터 초기응력의 영향은 초기변위 만큼 크지는 않으며 초기변위가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 그림Fig.3-(a), (b)는 각각 초기응력이 없는 경우와 있는 경우에 대한 최종강도 이전 하중 상태에서의 변형형상 및 응력분포를 보여주는데, 최종강도 이전 상태에서 응력분포가 초기응력의 유무에 따라 크게 다른 것으로 초기응력이 제대로 적용된 것을 확인할 수 있다.

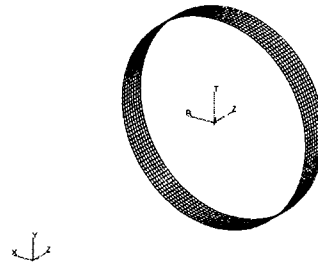
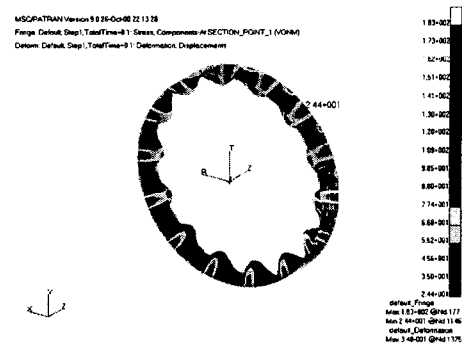
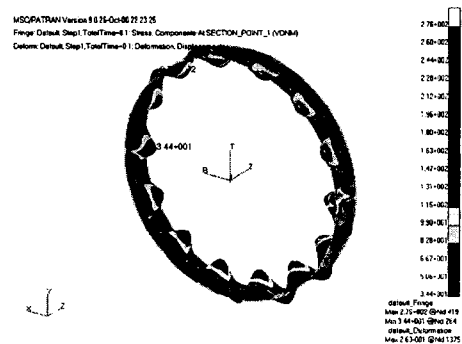


Fig.2 Finite element model(No. of circumferential mesh:172)



(a) without initial stresses



(b) with initial stresses

Fig.3 Deformed shape( $\omega = 0.003R$ , Load= $0.8\text{N/mm}^2$ )

Table 1 Comparison of collapse pressures for both cases i.e., with and without initial stresses ( $N/mm^2$ )

initial deflection( $\omega$ )	without initial stresses	with initial stresses	difference
0R	2.098	2.052	2.2%
0.001R	1.796	1.678	6.6%
0.002R	1.503	1.403	7.0%
0.003R	1.368	1.264	7.6%
0.004R	1.216	1.116	8.0%
0.005R	1.146	1.052	8.2%

### 5. 실제 실험모델에 대한 최종강도 해석

본 연구에서는 조 등[2]이 제작 실험한 4개의 실험모델(RS-4, RS-5, RS-6, RS-7)에 대하여 Full model analysis를 목표로 최종강도 해석을 수행하였는데, Bay 수가 많은 모델 전체를 있는 그대로 해석할 경우 계산시간이 너무 길어질 것으로 예상되어 동일한 간격으로 되어 있는 중앙부 Bay 들 중 3개만을 택하고 간격이 다른 양 끝 부분의 두 Bay 는 그대로 두는 방법으로 약간의 간략화를 시도하였다. 초기변위에 대해서는 좌굴모우드와 같은 형상으로

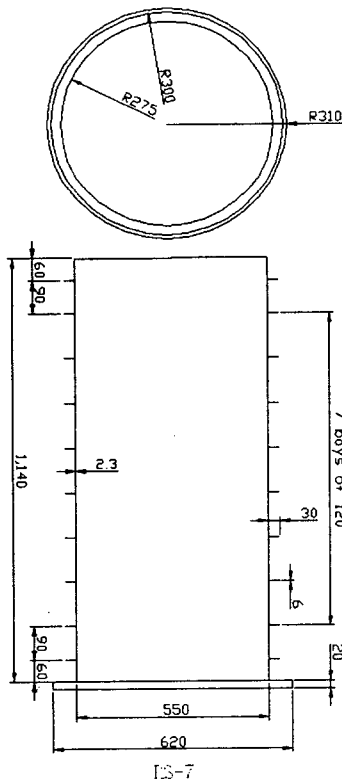


Fig.4 Test model(RS-7)

가정한 경우(RS-7 only)와 실제로 측정된 초기변위를 적용한 경우(4개의 실험모델 모두) 두 가지로 나누어 해석을 수행하였다. 실제 초기변위를 고려한 경우는 중앙의 한 Bay 만 실제 초기변위를 적용하고 나머지 Bay들은 초기변위의 진폭이  $\omega=0.001R$  로 아주 작은 좌굴모우드를 적용하여 실제 초기변위가 적용된 중앙 Bay 에서 붕괴가 발생하도록 하였다. Fig.4는 이들 모델 중 RS-7의 형상 및 치수를, Fig.5는 이에 대한 유한요소모델을 보여주고 있다.

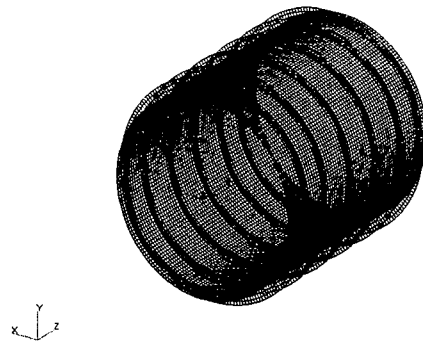


Fig.5 Finite element model(RS-7)

### 5.1 좌굴모우드를 초기변위로 적용한 경우

먼저 RS-7을 대상으로 좌굴모우드와 같은 형상의 초기변위를 가정한 채 초기응력이 없는 경우와 있는 경우 각각에 대해 초기변위의 진폭을 다양하게 변화시키며 해석을 수행하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Fig.6은 최종상태에서의 중앙단면의 붕괴모우드를 보여주고 있다. 여기서도 Single bay model 의 경우와 마찬가지로 초기응력의 영향은 초기변위의 정도에 따라 크게 달라지며 전반적으로는 Single bay model 의 경우 보다 낮은 것으로 나타나고 있다.

Table 2 Comparison of collapse pressures for both cases i.e., with and without initial stresses (RS-7,  $N/mm^2$ )

initial deflection( $\omega$ )	without initial stresses	with initial stresses	difference
0R	2.448	2.424	1%
0.001R	1.928	1.912	1%
0.002R	1.640	1.624	1%
0.003R	1.504	1.464	3%
0.005R	1.424	1.352	6%

\* Measured collapse pressure:  $1.746 N/mm^2$

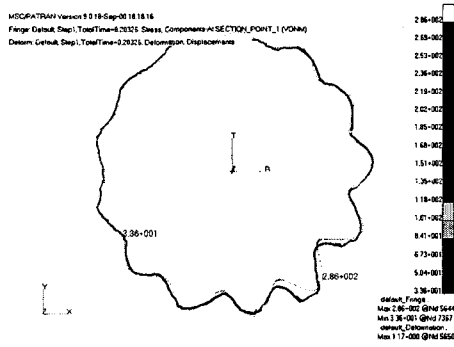
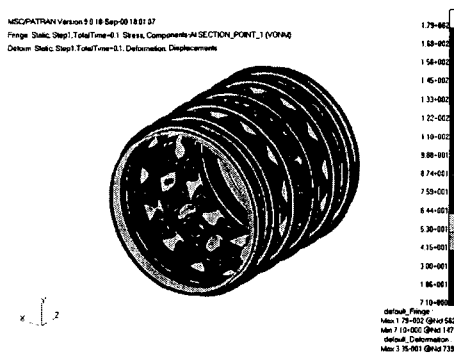


Fig.6 Mid-section at the ultimate state ( $\omega=0.002R$ , with initial stresses, Load= $1.624N/mm^2$ )

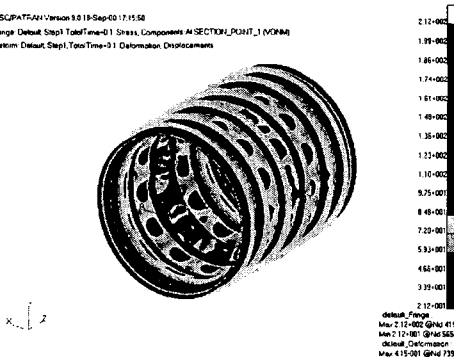
## 5.2 실제로 측정된 초기결함을 적용한 경우

앞서 언급한 4개의 실험모델(RS-4, RS-5, RS-6, RS-7)에 대해 실제로 측정된 초기변위를 적용하여 최종강도 해석을 수행하였다. Fig.7은 최종강도에 도달하기 전 상태에서의 Fig.8은 최종강도에 도달한 상태에서의 각각 초기응력이 없는 경우와 있는 경우에 대한 응력분포 및 변형형상을 보여주는데 Fig.8-(a), (b)의 응력분포의 차이로부터 초기응력이 제대로 적용된 것을 확인할 수 있다. 또한

Fig.9는 Mid-section에서의 Deformed shape을 보여주고 있는데 이를 Fig.6과 비교해 보면 실제로 측정된 초기변위를 적용한 경우 붕괴모우드가 좌굴모우드와는 전혀 다른 형상임을 알 수 있다. Table 3에는 각 모델에 대해 초기응력이 없는 경우와 있는 경우의 최종강도 계산값, 최종강도 실험값을 정리하였다. 여기서 초기응력의 영향은 1~2%의 최종강도 감소효과로 나타나고, 계산값과 실험값 사이에는 대략 10% 정도의 차이가 나타나는데 원통셸의 초기결함 민감도를 고려하면 이 정도의 오차는 계산상의 오차라기 보다는 초기변위 적용과정에서 발생하는 것으로 해석된다. 또한 Table 2와 Table 3을 비교해 보면 모델 RS-7의 경우 실제 초기결함에 대한 계산값은 진폭이 0.002R과 0.003R 사이에 있는 경우의 좌굴모우드에 대한 계산값과 같고, 실험값은 진폭이 0.001R과 0.002R 사이에 있는 경우의 좌굴모우드에 대한 계산값과 같음을 알 수 있다. 실험값이 진폭이 0.001R과 0.002R 사이에 있는 경우의 좌굴모우드에 대한 계산값과 같다는 사실은 박 등의 논문[3]에서 볼 수 있듯이 모델 RS-2의 경우에도 마찬가지로 앞서서는 원통셸의 최종강도 계산시 초기변위로서 진폭이 0.001R과 0.002R 사이에 있는 적당한 값을 갖는 좌굴모우드를 사용함으로써 상당히 신뢰할만한 최종강도 값을 구할 수 있을 것으로 사료된다.

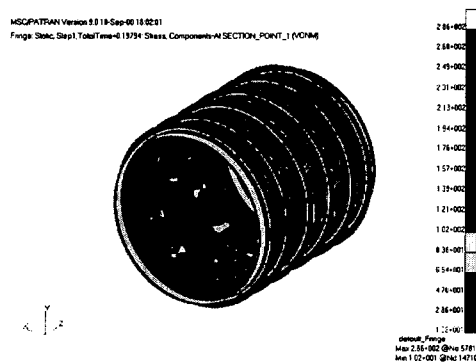


(a) without initial stresses

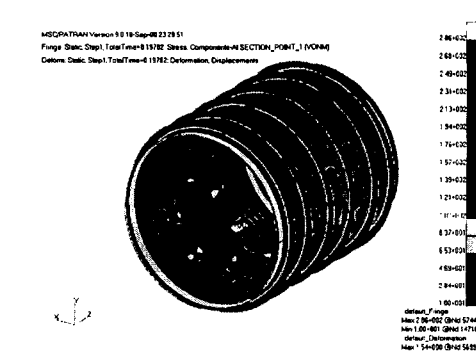


(b) with initial stresses

Fig.7 Deformed shape before ultimate state (Load= $0.8N/mm^2$ )



(a) without initial stresses



(b) with initial stresses

Fig.8 Deformed shape at the ultimate state ( Load= $1.536N/mm^2$ )

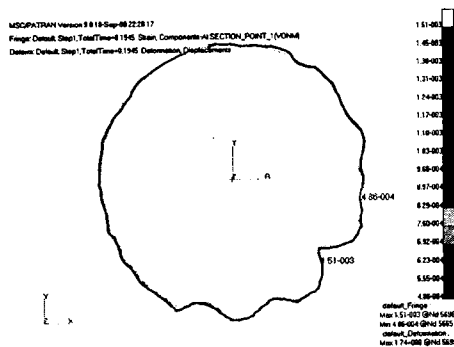


Fig.9 Deformed shape of mid-section(with initial stresses, Load=1.536N/mm<sup>2</sup>)

Table 3 Comparison of collapse pressures for both cases i.e., with and without initial stresses and measured values (N/mm<sup>2</sup>)

Model	Calculated values			Test values	Calculation error(%)
	without initial stresses	with initial stresses	difference (%)		
RS-4	2.072	2.048	1.2	1.844	+11.1
RS-5	1.712	1.688	1.4	1.815	-7.0
RS-6	1.896	1.864	1.7	2.119	-12.0
RS-7	1.560	1.536	1.5	1.746	-12.0

## 6. 결론

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS를 이용하여 원환보강 원통의 좌굴 및 최종강도 해석을 초기변위와 초기응력을 모두 고려하여 수행한 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 도출하였다.

- 1) 통상의 범용 유한요소 프로그램들이 갖는 기능인 선형 단성 좌굴해석과 비선형 응력해석을 조합하여 좌굴에 민감한 구조물의 최종강도를 추정할 수 있는 초기결합법을 개발하여 효과적으로 원통의 최종강도 해석을 수행하였다.
- 2) ABAQUS를 이용하여 초기변위와 초기응력을 동시에 고려한 최종강도해석을 성공적으로 수행하였다. 이 과정에서 특히 주의를 요하는 것은 초기응력 부여시 응력들이 반드시 자체평형을 이루도록 해야 한다는 사실이다. 해석 결과 최종강도는 초기변위에 상당히 민감하여 초기변위 0.005R에서 Single bay model의 경우 45%, RS-7 model의 경우 44%의 강도 저하가 있는 것으로 나타났다. 반면에

초기응력에 대한 민감도는 상대적으로 낮으며 초기변위의 증가와 함께 증가하는 것으로 나타났다.

3) 최종강도에 대한 실험값과 계산값 사이에는 약 10% 정도의 오차가 나타나고 있으나 원통셀의 최종강도에 대한 초기변위 민감도를 감안하면 이 정도의 계산 정도는 상당히 양호한 것으로 판단되며, 추가적인 Parametric study가 필요하긴 하나 원통셀의 최종강도 계산시 초기변위로서 진폭이 0.001R과 0.002R 사이에 있는 적당한 값을 갖는 좌굴모우드를 사용함으로써 상당히 신뢰할만한 최종강도 값을 얻을 수 있을 것이라는 잠정적인 결론을 내릴 수 있다.

4) 일단 초기결합을 고려할 수 있는 최종강도해석법은 개발하였으나 원환보강 원통셀의 강도 특성에 대한 일반적인 결론을 내리기 위해서는 좀 더 다양한 치수비를 갖는 모델들에 대한 해석을 수행하여야 할 것이다.

5) 여기서는 초기응력으로서 두께방향으로 균일하게 분포하는 용접잔류 응력만을 고려하였는데 실제로 제작되는 원환보강 원통에는 두께방향으로 불균일한 분포를 보이는 다양한 형태의 초기응력이 존재하므로 이를 고려할 수 있는 해석법의 개발이 요구된다.

## 참고문헌

- [1] BS 5500, 'Specification for unfired fusion welded pressure vessels', British Standards Institution, with modification, 1976
- [2] 조상래, 김승민, "원환보강 원통의 최종강도 실험연구", 대한조선학회 2000년도 추계학술대회논문집, pp.314~319
- [3] 박치모, 이승훈, "상용소프트웨어를 이용한 원환보강 원통의 최종강도해석(I)", 한국해양공학회 2000년도 추계학술대회논문집, pp.271~274
- [4] ABAQUS/Standard User's Manual, Habbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 1997
- [5] J. P. Kenny & Partners Ltd, Buckling of Offshore Structures: A state-of-the art review, Gulf Publishing Company, 1984
- [6] Owen F. Hughes, Ship Structural Design: A Rationally-Based, Computer-Aided, Optimization Approach, John Wiley & Sons, 1983