

# 상용소프트웨어를 이용한 원환보강 원통의 최종강도 해석(I)

박치모, 이승훈  
울산대학교 수송시스템공학부

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

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, Commercial softwares 상용 소프트웨어

**ABSTRACT:** Despite the increasing necessity of accurate estimation of ring-stiffened cylinders' ultimate strength, the complex structural behavior of cylinders has made their design mainly depend on empirical formulas mostly based on insufficient test data rather than theoretical background. This paper has developed the imperfection method which enables the ultimate strength analysis of buckling sensitive structures by combining two general functions of common commercial finite element softwares, linear elastic buckling analysis and nonlinear stress analysis. Developed method was applied to two of the world most renowned commercial softwares, MSC/NASTRAN and ABAQUS, for the analysis of ring-stiffened cylinders and unexpectedly big difference in their analysis results was found. This tells that many widely used commercial softwares has their different strong points and week points and the choice of commercial software should be cautiously made after thorough inspection. This paper ends with some useful information about which of the aforementioned two softwares is more appropriate respectively for linear elastic buckling analysis and ultimate strength analysis 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 진적으로 실험에 의존하고 있는 실정이다. 이론적인 해석방법 중 선형탄성 좌굴해석은 별 문제가 없으나 실제 구조물의 경우 극히 얇은 쉘로 이루어진 경우를 제외하고는 대부분 붕괴하중에 도달하기 전에 대변형, 탄소성 거동을 거치게 되어 있어 실용적인 의미가 거의 없는 실정이다. 한편, 비선형(탄소성, 대변형 거동을 포함) 해석의 경우 3차원 유한요소해석은 이론상으로는 가능하였으나 계산시간이 방대하여 어느 한 모델의 최종강도 추정이 아닌 parametric study를 통한 설계식의 개발에는 실용성이 거의 없는 것으로 판단되어 이제까지 별로 관심을 끌어오지 못했던 것이 사실이다. 그러던 차에 박[1]은 탄소성, 대변형 거동을 포함하는 비선형 해석을 수행하면서 계산시간을 줄여 실용성을 확보하는 1차원 해석 방법을 개발하여 기존의 실험결과와 비교연구를 수행한 바 있으나, 제작과정에 필연적으로 포함되는 초기변형, 잔류응력 등의 초기결함에 민감한 원통셸의 구조특성에 비해 이들을 정밀하게 계측한 실험자료의 부족으로 인해 해석의 타당성을 신뢰

성 높게 검증하기 어려웠던 것이 사실이다. 그러나 최근 MSC/NASTRAN, ABAQUS 등 유한요소법에 기초한 상용 Software 들의 해석 기능과 컴퓨터 자체의 계산성능의 향상 등으로 인해 보편적으로 타당성을 인정받는 이들 상용 Software 들을 이용하여 보강원통의 최종강도를 수행하는 것이 의미있는 일로 사료되어 본 연구를 수행하게 되었다. 본 연구에서는 이들 상용 Software를 이용하여 원환보강 원통의 최종강도를 효율적으로 추정하는 방법을 개발하고 세계적으로 가장 널리 사용되는 유한요소법에 기초한 상용 Software 들 중 MSC/NASTRAN 과 ABAQUS 두 가지를 사용하여 해석을 수행하고 이들 결과를 비교해 봄으로써 좀 더 타당성 있는 거동 추정은 물론 이들 상용 Software를 사용하는데 있어서의 문제점까지도 살펴볼 수 있도록 하였다. 초기결함(초기변형, 초기응력)을 고려한 최종강도 해석을 수행하고자 할 때 이들 두 Software 가 갖는 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.

-MSC/NASTRAN은 널리 보급되어 사용법을 익히기 쉽고, pre/post-processor가 잘 갖추어져 있으나 초기변형만 고려되고 초기응력을 고려할 수 없다는 한계가 있다.

-ABAQUS는 사용자수가 적어 사용법을 익히는 것이 어렵고, pre/post-processor가 여타의 software 에 비해 잘 갖추어져 있지 못해 다른 software의 pre-processor를 활용해야 하며 특수한 문제의 해석을 위해서는 입력데이터 작성에 일부 수작

업도 병행해야 하는 등의 문제점이 있으나 초기변형과 초기응력을 모두 고려할 수 있는 장점이 있다.

## 2. 최종강도 해석법

유한요소법을 이용하여 좌굴에 민감한 구조물의 최종강도 해석을 수행하는 방법으로서 비선형 후좌굴해석법과 초기결함법(Imperfection method)을 들 수 있는데 비선형 후좌굴해석법은 초기형상결함의 영향을 정량적으로 파악하기 어려울 뿐만 아니라 대부분의 상용 소프트웨어들이 이 방법을 지원하고 있지 않는데 반해 초기결함법은 그 자체가 초기결함을 포함시키는 방법인데다가 선형 탄성좌굴해석과 비선형 응력해석을 지원하는 모든 유한요소 해석프로그램의 활용으로 해결가능한 방법이기 때문에 대부분 이 방법을 사용하고 있고 본 연구에서도 이 방법을 채택하기로 한다. 이것은 선형 좌굴모우드와 같은 형상의 미소한 변형을 초기조건으로 부여하고 이에 대한 비선형 구조해석을 수행하여 하중-변위 관계를 구한 뒤 하중이 도달할 수 있는 최대값을 찾는 방법으로서 하중-변위 관계를 구하기 위한 비선형 해석프로그램으로는 하중증분법, 변위증분법, Riks method 등이 있는데 이들 각각의 특징을 간략히 요약하면 다음과 같다.

-하중증분법; 최고하중점까지는 하중-변위 관계를 구할 수 있으나 그 이후의 거동인 unloading path를 찾지 못하는 것이 단점

-변위증분법; 변위증분법은 최종강도 이후의 거동까지도 찾아낼 수 있으나 모든 변위 성분들이 일정 비율로 증가하지 않는 원통과 같은 복잡한 구조에는 적용할 수 없는 것이 문제

-Riks method[2]; 하중과 변위를 동시에 미지수로 보고 'arc length'라고 하는 새로운 parameter를 도입해 하중-변위 곡선을 추적해 가는 방법으로서 최종강도 이후의 거동인 unloading path까지 찾을 수 있으나, 하중성분들 사이에 비례관계가 유지되는 문제에만 적용 가능

이상과 같은 특징으로 인해 본 연구에서는, 최종강도 이후의 거동인 unloading path까지 찾을 수 없는 아쉬움은 있으나, 우선 하중증분법을 이용하기로 하고 unloading path를 찾는 문제는 향후의 연구과제로 돌리기로 한다. 실제로 MSC/NASTRAN 이나 ABAQUS 등의 유한요소해석 프로그램에 초기결함법을 적용하여좌굴에 민감한 구조물의 최종강도해석을 수행하는 과정은 다음과 같다.

- 1) Fig.1과 같은 원환보강 원통에 대해 유한요소 모델링을 수행한다.
- 2) 유한요소모델에 대한 선형탄성 좌굴해석을 수행하여 좌굴모우드를 구한다.
- 3) 좌굴모우드에 적절한 Scaling factor를 곱함으로써 진폭을 조정한 뒤 이를 비선형 해석의 초기변형 값으로 부여한다.
- 4) 위의 모델에 대해 비선형 유한요소해석을 수행한다.

## 3. 적절한 요소분할

먼저 해석하고자 하는 원환보강 원통모델의 적절한 요소분할 정도를 결정하기 위하여 Length: 80mm, Radius: 275mm,

Thickness: 2.21mm 의 Single-bay model을 5가지의 다양한 요소수로 분할하고 각각에 대한 선형 탄성좌굴해석 및 최종강도 해석을 MSC/NASTRAN을 이용하여 수행하고 그 결과를 Table 1 에 정리하였다. 이로부터 원주방향의 요소수가 대략 150개 이상이면 어느 정도 만족할 만한 해가 얻어지는 것을 알 수 있다. 또한 Table 1 에는 von Mises의 공식[3]에 의한 좌굴하중값도 표시하였는데 FEM 의 해석결과와 잘 일치하는 것을 보여주고 있다.

Table 1 Variation of analysis results in accordance with mesh fineness(Load: Hydrostatic pressure, B.C.: Simple support at both ends)

\* No. of circumferential buckling mode=14

No. of circumferential mesh	Elastic buckling pressure ( $N/mm^2$ )		Ultimate Strength ( $N/mm^2$ ) ( $\omega=0.005R$ )
	FEM (NASTRAN)	von Mises	
44	7.413	4.895	2.100
88	5.284		1.288
132	4.978		1.200
176	4.896		1.188
216	4.800		1.163

## 4. 해석 모델

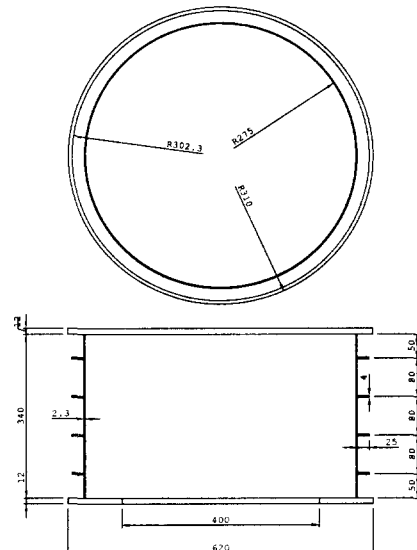


Fig.1 Test model(RS-2)

조 등[4]은 여러 개의 실험모델을 직접 제작하여 원환보강 원통의 최종강도의 실험을 수행한 바 있다. 본 연구에서는 실험치와의 비교목적으로 그중 한 개를 선택하여 계산을 수행하였는데 그 모델의 형상 및 치수는 Fig.1에 보인 바와 같다. 특히 본 연구에서는 여러 개의 원환으로 보강된 Multi-bay model 과 원환보강재 사이의 Shell 에 해당하는 Single-bay model 과의 거동 차이를 고찰할 목적으로 실험모델 전체에 해당하는 Full Model 과 중앙부 한 보강재 간격을 취한 Single-bay model 에 대해 별도로 해석을 수행하였다

### 5. 최종강도해석 및 결과고찰

Single-bay Model의 해석에서 살펴본 결과 적절한 원주방향 요소분할수는 150~200 등분 정도라는 판단에 따라, 원주방향으로 180등분하여 각각 Single-bay model과 Full Model에 대한 유한요소 모델링을 하였다. Fig.2는 이와같이 수행한 Full Model의 유한요소 모델링 형상을 보여주고 있다. 또한 초기결합중 초기변형이 최종강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 초기변형이 없는 경우(OR)와 초기변형의 최대 진폭이 각각 반경의 0.001R, 0.002R, 0.003R, 0.004R, 0.005R 인 6가지 경우에 대한 해석을 MSC/NASTRAN과 ABAQUS 두 가지 유한요소프로그램을 이용하여 동일한 조건하에서 수행한 뒤 각각의 경우에 대한 최종강도 값을 Table 2에 정리하였다. 또한, Fig.3은 초기변형의 진폭  $\omega=0.005R$  인 경우에 대한 변형 형상을

을 Fig.4는 이에 대한 하중-변위 곡선을 보여주고 있다. 실험 모델은 원형으로부터 이탈된 최대 초기변위가 0.0064R 로 예측된 것에 반해, Table 2에 의하면, 최종강도에 대한 실험치는 2.58 N/mm<sup>2</sup> 로서 계산치에 비해 훨씬 큰 것처럼 나타나고 있는데 이것은 예측된 초기결합이 원형으로부터 이탈된 최대치 일뿐 붕괴모우드에 대한 초기변형 진폭이 아닐 수도 있기 때문에 직접적인 비교가 무의미하다는 논리로 설명할 수 있다. 어쨌든 실험치가 여러 초기변위에 대한 계산치들의 범위 내에 들어가는 것으로 일단 계산치의 부분적인 신뢰는 가능할 것으로 본다. BS5500 의 실험식에 의한 값은 더욱 좋은 일치를 보이고 있으나 BS5500의 실험식이 어떤 특정 초기변위값에 기초를 두고 만들어진 것이 아니라는 점을 감안하면 이것 역시 타당성 검증에 있어 하나의 참고가 될 뿐이다.

또한, 원환보강재의 회전에 대한 탄성지지효과를 고려하면 Full Model의 국부좌굴 모우드에 대한 최종강도값이 Single-bay Model의 두 극단적인 경계조건 즉, 단순지지와 고정조건에 대한 최종강도 값들 사이에 들어가는 것이 합당하다고 판단되는데, Table 2에 나타난 바에 의하면, ABAQUS에 의한 해석결과는 이 조건을 만족하는데 반해 MSC/NASTRAN에 의한 계산결과는 그렇지 못한 현상을 보이고 있어 원환보강 원통의 최종강도 해석에는 ABAQUS가 더 적합한 것으로 사료된다. 그러나 탄성좌굴하중은 MSC/NASTRAN에 의한 계산결과가 ABAQUS의 경우 보다 von Mises의 해석해에 훨씬 가까운 현상을 보이고 있다.

Table 2 Comparison of collapse pressures and critical load analyzed by ABAQUS and MSC/NASTRAN, ( ): Calculated values by MSC/NASTRAN

해석종류	해석모델 초기변위	SINGLE-BAY (Both ends simply supported)	FULL MODEL				SINGLE-BAY (Both ends fixed supported)
			FEM		Experiment	Empirical formula (BS5500) [4]	
			Both ends fixed	Both ends simply supported			
원주방향 해석 (N/mm <sup>2</sup> )	OR	2.104 (2.250)	2.582 (2.875)	2.342	2.580	2.119	2.675 (2.825)
	0.001R	1.809 (1.825)	2.420 (2.575)	2.276			2.496 (2.550)
	0.002R	1.585 (1.575)	2.206 (2.375)	2.011			2.346 (2.375)
	0.003R	1.429 (1.400)	2.075 (2.275)				2.257 (2.250)
	0.004R	1.240 (1.275)	1.833 (2.225)				2.185 (2.175)
	0.005R	1.156 (1.200)	1.752 (2.175)				2.128 (2.150)
좌굴해석 (N/mm <sup>2</sup> )	좌굴하중	5.334 (4.911)	7.450 (6.940)				10.915 (8.417)

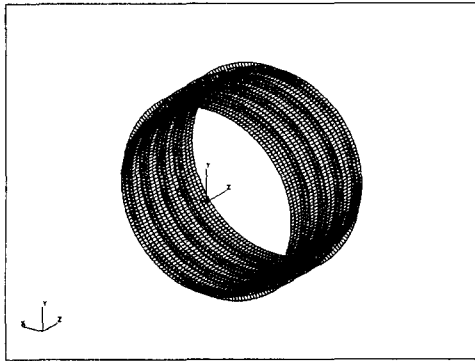


Fig.2 Finite element model  
(No. of circumferential mesh:180)

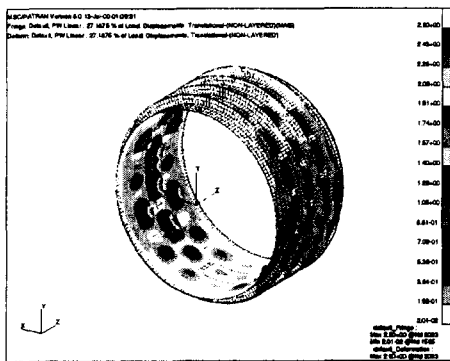


Fig.3 Deformed shape ( $\omega=0.005R$ )

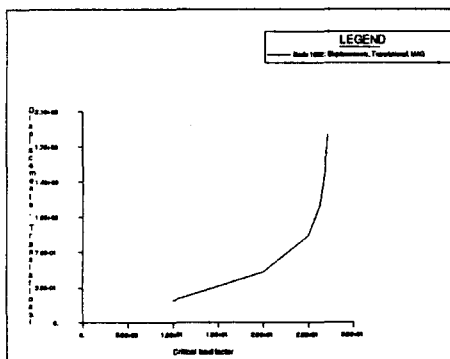


Fig.4 Load-Deflection curve ( $\omega=0.005R$ )

## 6. 결론

본 연구에서는 두 가지 유한요소해석 프로그램, MSC/NASTRAN과 ABAQUS를 이용하여 원환보강 원통의 좌굴 및 최종강도 해석을 초기변위를 고려하여 수행한 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 도출하였다.

- 1) 통상의 범용 유한요소프로그램들이 갖는 기능인 선형탄성 좌굴해석과 비선형 응력해석을 조합하여 좌굴에 민감한 구조물의 최종강도를 추정할 수 있는 초기결합법을 개발하여 효과적으로 원통의 최종강도 해석을 수행하였다.
- 2) 세계적으로 유명한 두 소프트웨어를 이용하고 그들의 해석 결과를 비교하여 큰 차이를 발견함으로써 원통과 같은 복잡한 구조해석의 경우 이들 소프트웨어의 개선의 필요성과 소프트웨어 선택에 있어 면밀한 검토의 필요성을 확인하였다.
- 3) 두 소프트웨어에 의한 해석의 비교결과 탄성좌굴 해석에는 MSC/NASTRAN이 최종강도 해석에는 ABAQUS가 더 합리적인 결과를 주는 것으로 나타났다.
- 4) 앞으로 해석결과와 실험결과와의 좀 더 합리적인 비교를 위해서는 실험모델에서 측정된 초기변형을 모우드별로 성분분해하여 실제의 붕괴모우드에 해당하는 진폭만을 고려할 필요가 있는 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- [1] 박치모, "원통구조의 최종강도 추정을 위한 효율적인 유한요소해석", 한국해양공학회지, 제10권 제4호, pp.28~37, 1996.11
- [2] ABAQUS/Standard User's Manual, Habbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 1997
- [3] S.P. Timoshenko and J.M. Gere, Theory of Elastic Stability, McGRAW-HILL, 1961
- [4] 조상래 등, "원환보강원통 최종강도의 실험연구", 선박해양구조연구회 논문집, 제14권, 제1호, 2000년 2월
- [5] BS 5500, 'Specification for unfired fusion welded pressure vessels', British Standards Institution, with modification, 1976.