

## 초기결함의 영향성을 고려한 원통형 쉘의 휨 좌굴 강도 연구

장민서<sup>1</sup>, 박종섭<sup>2</sup>, 이윤우<sup>1</sup>, 강성용<sup>1</sup>, 강영종<sup>\*</sup>  
<sup>1</sup>고려대학교 건축사회환경공학과, <sup>2</sup>상명대학교 건설시스템공학과

### A Study of the Effect of Imperfection on Buckling Strength in Thin Cylindrical Shells under Bending

Min-Seo Jang<sup>1</sup>, Jong-Sup Park<sup>2</sup>, Yun-Woo Lee<sup>1</sup>, Soung-Yong Kang<sup>1</sup>, Young-Jong Kang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil & Environmental Engineering Korea University

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Sangmyung University

**요약** 압축력을 받는 얇은 원통형 쉘 구조물은 좌굴에 대한 안정성을 검토해야 한다. 좌굴에 대한 검토 시, 좌굴강도에 민감한 영향을 미치는 초기결함에 대한 중요성은 많은 선행연구에서 언급하였으나 다양한 초기결함의 영향성을 반영 할 수 있는 좌굴강도 연구가 필요하다. Eurocode에서 제시하고 있는 초기결함의 영향성을 반영하는 설계 계수  $\alpha$ 의 경우도 단면의 두께로 결정되는 특정 초기결함만을 포함하고 있어 다양한 초기결함에 대한 좌굴강도를 예측하기 어렵다. 본 논문에서는 초기결함의 영향성을 보기 위해 초기결함의 크기를 변화시켜가며 휨을 받고 있는 원통형 단면의 좌굴강도를 기하-재료비선형 해석을 통해 얻어내었다. FEM해석을 통하여 다양한 초기결함을 반영할 수 있는 수정된  $\alpha'$ 을 제안하여 보다 합리적인 원통형 휨 좌굴강도를 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

**Abstract** The thin cylindrical shell structure under compression should be checked with buckling stability. Initial imperfection effects on buckling strength has been investigated by many researchers. Even though there have been a number of these studies, more studies of buckling strength with various initial imperfections are still necessary. In Eurocode, there is a design parameter that is applicable only on specific imperfection by section thickness rather than on various initial imperfection. In this study, structural analyses, using geometry and material nonlinear analysis, of cylindrical buckling strength with various initial imperfection were performed and compared with Eurocode design strength and Finite Element Method (FEM) analysis results. Moreover, the modified design parameter, which gives more exact prediction result of buckling strength under bending with initial imperfection, is proposed for various initial imperfections.

**Key Words** : Bend buckling, Buckling strength, Cylindrical shell buckling, Geometry and material nonlinear analysis, Initial imperfection

### 1. 서론

다양한 형태의 원통형 쉘은 해양구조물, 비행기 동체 등과 같은 복잡한 구조물의 구조요소로 사용되어지고 있는데, 각각의 구조물의 역할에 따라 여러 가지 하중이 작용하게 된다. 특별히 압축력을 받는 원통형 쉘의 좌굴거

동은 전형적인 구조적으로 고려해야 하는 문제 중 하나이며 구조공학자들에게 많은 관심의 대상이 되어왔다. 일정한 압축력을 받은 원통형 쉘에 대한 탄성 좌굴강도 식은 잘 알려진 다음 Eq. (1)과 같다.

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left( \frac{t}{r} \right) \quad (1)$$

본 연구는 국토해양부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 12기술혁신E09)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Young-Jong Kang(Korea Univ.)

Tel: +82-2-3290-3317 email: [yjkang@korea.ac.kr](mailto:yjkang@korea.ac.kr)

Received February 17, 2015

Revised March 4, 2015

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

여기서  $E$ 는 탄성계수,  $\nu$ 는 Poisson's ratio,  $r$ 과  $t$ 는 각각 원통형 단면의 반지름과 두께이다. Eq. (1)에 의해 얻어지는 탄성 좌굴강도는 일반적으로 초기결함을 고려하지 않는 이론값이므로 실험값이나 실제 좌굴강도보다 큰 강도를 나타낸다[1,2]. 이와 같은 이론값과의 차이에 대한 여러 연구결과에 의하면 축방향 압축력을 받는 원통형 셀에서 초기좌굴 후 경로(initial postbuckling path)가 불안정하거나, 좌굴거동의 비선형 연성(nonlinear coupling)에 의해 기하학적 초기결함에 민감하게 반응하여 이론값과의 차이를 발생한다는 결론[2,3,4]이 일반적이다. 단면의 초기결함 영향을 고려하지 않고 좌굴강도를 계산하여, 실제 제작과정에서 발생하는 초기결함으로 인한 기하학적 비선형이 유발하는 좌굴강도 저하를 반영하지 못하기 때문이다. 기하학적 초기결함은 원통의 제작과정에서 필연적으로 발생하는 부분으로 실제적인 원통형 셀의 합리적인 좌굴강도 예측을 위해서는 초기결함을 고려한 해석 및 연구가 수행되어야 한다.

축방향 압축력을 받는 원통형 셀의 좌굴강도에 대한 연구[2,4,7]는 참고문헌 이외에도 다양하게 이루어졌지만, 휨을 받는 원통형 셀의 좌굴강도에 대한 연구는 상대적으로 적었다. 이것은 주로 원통형 셀 단면의 경우 단순히 외압이나 축방향 압축력을 받는 구조물로 많이 사용되어 왔기 때문에 휨에 대한 연구의 필요성이 상대적으로 적었던 것으로 판단된다. 그러나 해양플랜트의 파이프라인이나[5,6] 라이저, 풍력발전기의 타워[7]부분에서는 휨에 대한 좌굴에 대한 안정성 검토가 요구되어지고 있으며 휨에 대한 하중이 지배적으로 작용하는 구조물 중 하나로써 휨에 대한 구조적 좌굴 안정성을 검토해야 한다.

원통형 셀 단면의 초기결함을 고려하지 않는 이론적 탄성 휨좌굴 강도는 축방향 압축력에 의한 탄성 좌굴강도와 소성 좌굴강도를 원통형 셀 단면의 단면계수를 통하여 다음과 같이 나타낸다. 여기서  $r$ ,  $t$ 는 원통의 반지름과 두께이며, 탄성계수  $E$ 와 Poisson's ratio  $\nu$ , 항복응력  $\sigma_y$ 를 통하여 구할 수 있다.

$$M_{cr} = (\pi r^2 t) \left( \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{t}{r} \right) \quad (2)$$

$$M_p = 4r^2 t \sigma_y \quad (3)$$

국외의 선행연구로 원통형 셀의 좌굴강도를 EN 1993-1-6(Eurocode 3-Design of steel structures)[8]에

서 기준을 제시하고 있다. 또한 EN 1993-1-6에서는  $\alpha$  (elastic imperfection reduction factor)라는 좌굴강도에 초기결함의 영향을 고려할 수 있는 계수를 제시하고 있다.

Sotiria Houliara(2011)[1]는 재료비선형 해석을 통하여 초기결함의 크기는 동일하더라도 초기결함 형상에 따른 좌굴강도 차이에 대한 분석을 수행하여 Eurocode에서 제시하는 좌굴 강도는 매우 보수적인 제한을 두고 있다는 결론을 내렸다. Hartono Yudo(2014)[5]의 박사학위논문에서는 해양구조물의 파이프라인을 대상으로 초기결함의 영향성은 긴 원통에 비해 짧은 원통일수록 좌굴강도에 미치는 영향이 크다는 결론과 진원도 오차로 인한 초기결함보다 좌굴을 유발하는 하중과 관련된 초기결함이 좌굴강도에 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다. Tohid Ghanbari Hjazijahani(2012)[3]는 원통형 셀 단면에 대한 실험을 수행하여 좌굴형상 모드를 확인하고 FEM해석 결과와 비교하였다. 실험값과의 해석 오차의 원인으로 적절한 초기결함을 해석시 반영하지 못한 것으로 결론을 내었다. J. M. Rotter(2011)[4]는 Eurocode의  $\alpha$  (elastic imperfection reduction factor)값 산정을 위한 수정된 좌굴강도 곡선을 제시하였고, 초기결함 크기의 변화만이 좌굴강도에 미치는 영향성을 보고자 하였으나 초기결함의 크기 차이로 인한 기하적 비선형성까지 비선형 해석결과에 영향을 미치게 되어  $\alpha$  값 산정이 어렵다는 결론을 내렸다. 그리하여 재료의 항복강도( $\sigma_y$ )를 변화시켜  $M_p$ 를 매개변수로 하여  $\alpha$  값을 산정하는 방법을 제시하였다. 그러나 일반적으로 대부분의 구조물이 강재를 사용하기 때문에 이러한 항복강도를 변화시켜 구한 값을 강재 구조물에 적용시키기 합리적이지 못하며, 단면 외부 보강재 용접부위에 대한 초기결함을 기준으로 제시하여 일반적으로 사용하기 어려운 제약이 있다.

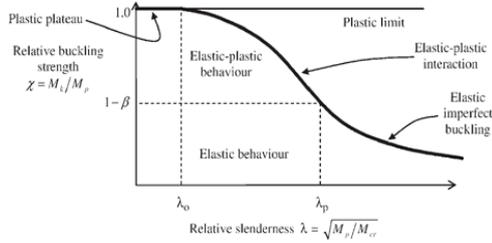
본 논문에서는 기하학적 초기결함을 갖는 원통형 셀이 휨 하중을 받는 경우의 좌굴강도를 분석하기 위해 초기결함에 따른 좌굴해석을 수행하였다. 초기결함의 영향성을 비교하기 위해 EN 1993-1-6[8] 설계기준에서 제시하고 있는 원통형 셀 좌굴강도식과 범용유한요소해석프로그램인 Abaqus 6.13-1 프로그램을 이용하여 초기결함을 반영한 기하·재료비선형 해석결과를 비교하여 좌굴강도에 미치는 초기결함 영향을 분석하였다.

## 2. 원통형 셸 좌굴강도 설계기준 검토

### 2.1 Eurocode 3-Design of steel structures

#### 2.1.1 EN 1993-1-6 capacity curve for shell buckling

좌굴감소 계수와 Eurocode[8]에서 제시하는 Relative slenderness와의 관계를 이용하여 원통형 셸 좌굴강도 곡선을 Fig. 1과 같이 나타내고 있다.



[Fig. 1] Capacity curve for shell buckling

$\lambda$  (Relative slenderness)는 전단면이 항복하는  $M_p$  (Full plastic moment, Eq. (3))와  $M_{cr}$  (Liner bifurcation analysis, Eq. (2))로 구성되어 있으며, 무차원 값인 좌굴 감소 계수  $\chi$ 는 다음과 같다.

$$\lambda = \sqrt{M_p/M_{cr}} \quad (4)$$

$$\chi = M_k/M_p \quad (5)$$

여기서  $M_k$ 는 실험을 통하여 구하거나 초기결함을 고려한 기하-재료비선형 해석(Geometrically and Materially Nonlinear explicit Imperfection Analysis, GMNIA)을 통하여도 얻을 수 있는 좌굴강도이다.

Eurocode[8]의 좌굴감소 계수  $\chi$ 는 단면의 세장비에 따라 다음 식으로 결정된다.

$$\chi = 1 \quad \lambda \leq \lambda_0$$

$$\chi = 1 - \beta \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^\eta \quad \lambda_0 \leq \lambda \leq \lambda_p \quad (6)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\lambda^2} \quad \lambda_p \leq \lambda$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{0.62}{1 + 1.91(\Delta w_k/t)^{1.44}} \quad (8)$$

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} t \quad (9)$$

좌굴감소 계수와 세장비의 관계는  $\alpha$  (elastic imperfection reduction factor),  $\beta$  (plastic range factor),  $\lambda_0$  (squash limit relative slenderness) 그리고  $\eta$  (interaction exponent)의 계수로 이루어져 있다. 초기결함을 반영하는  $\alpha$  값을 계산하는 방법은 Eq. (8)과 같다. 여기서  $\Delta w_k$  (characteristic imperfection amplitude)는  $Q$  (meridional compression fabrication quality parameter)의 등급에 따라 Eq. (9)와 같이 결정된다. 본 논문에서는 EN 1993-1-6, ANNEX D에서 제시하는  $Q=16$  (Class C)을 해석에 적용하여 분석하였다. 또한 EN 1993-1-6 ANNEX D에서는 원통형 셸에 대해서  $\lambda_0 = 0.2$ ,  $\beta = 0.6$  그리고  $\eta = 1.0$ 을 사용하도록 제시하고 있다.

[Table 1] Values of fabrication quality parameter Q

Fabrication tolerance quality class	Description	Q
Class A	Excellent	40
Class B	High	25
Class C	Normal	16

### 2.2 설계기준 고찰

해양구조물 및 풍력발전설계 관련 설계기준인 DNV[9]에서도 원통형 셸 좌굴에 대한 기준이 존재 한다. 그러나 단순히 탄성좌굴 강도를 구하는 부분에 있어서는 하중에 특성에 따라 주어진 탄성좌굴 강도 식에 각 하중 별 계수를 적용하여 쉽게 구할 수 있으나 DNV-RP-C202[9]에 나와 있는 이론적 강도 식은 제작 시 초기결함이나 잔류 응력으로 인하여 실제 강도와 차이 있음을 명시 하였다. DNV-OS-C401[10] 기준에서는 각각의 단면의 형상 별 최대 제작오차 기준치를 제시하고 있으며 초기결함의 크기에 따른 좌굴강도 영향성을 반영하지 못하고 있다.

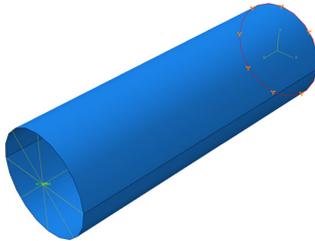
그에 비해 Eurocode[8] 좌굴강도 식에서는  $\alpha$  (elastic imperfection reduction factor) 값을 사용하여 초기결함의 영향을 좌굴강도에 반영하고 있는 것을 확인하였다. 그러나 단면의 형상에 따라, 두께에 대한 비율로 일정한 초기결함을 적용하여 반영하고 있었다. Sotiria Houliara(2011)[1]는 재료비선형 해석만을 수행한 결과에서도 Eurocode[8]에서 초기결함을 고려한 강도식이 보수적이라는 결론을 내렸으며, 다양한 연구 결과들이 초기결함의 크기에 따라 좌굴강도에 미치는 영향이 지대하다는 결론을 내렸다.

본 연구에서는 일정한 초기결함이 아닌 초기결함의 크기에 따른 좌굴강도를 계산하여 보다 합리적인 좌굴강도 평가를 위해, 범용유한요소해석프로그램인 Abaqus 6.13-1 을 사용하여 초기결함을 반영한 기하·재료비선형 좌굴해석을 수행하였다.

### 3. 유한요소 해석 및 분석

#### 3.1 해석 모델

초기결함을 반영한 기하·재료비선형 좌굴해석을 위하여 Fig. 2와 같은 해석모델을 선정하였다. 해석모델에 적용한 강재는 SM520( $\sigma_y = 335 \text{ MPa}$ ,  $E = 205 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ )이며 해석모델의 직경과 길이를 각각  $D = 4,000 \text{ mm}$ ,  $L = 12,000 \text{ mm}$  로 일정하게 고정시키고 원통형 셸의 두께를 변화시켜가며 세장비에 대한 매개변수 해석을 수행하였다.



[Fig. 2] Analysis model

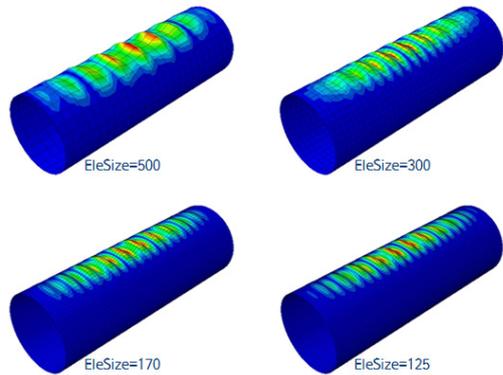
원통형 셸 끝단의 회전 및 변위를 0으로 제한시켜 Fixed 조건을 주었으며, 하중을 가하는 지점은 Abaqus 상의 MPC 옵션을 사용하여 Rigid bar를 연결한 상태로 만든 뒤 중앙 포인트에 모멘트 하중을 가하였다.

#### 3.2 Linear Bifurcation Analysis (LBA)

원통형 셸의 휨에 대한 좌굴형상을 Eigenvalue 해석을 통하여 구하기 위해 LBA를 먼저 수행하였다. 추후 기하비선형 해석시간의 단축 및 적절한 해석결과를 얻기 위하여 선형해석 단계인 LBA에서 Fig. 3과 같이 요소 수렴도 해석을 통하여 1.01% 차이가 나는 Ele.Size 170을 앞으로 해석에 사용할 요소 크기로 결정하였다.

[Table 2] Element convergence check

Ele.Size	Ele.Number	Eigenvalue	
100	15,120	1.2745E+12	100.00%
120	10,400	1.2778E+12	99.74%
125	9,600	1.2786E+12	99.68%
130	8,832	1.2795E+12	99.61%
140	7,740	1.2811E+12	99.48%
150	6,720	1.2831E+12	99.33%
170	5,254	1.2874E+12	98.99%
200	3,720	1.2951E+12	98.39%
300	1,680	1.3247E+12	96.06%
500	624	1.4164E+12	88.87%



[Fig. 3] Element convergence check

[Table 3] Imperfection amplitude

L (mm)	R (mm)	t (mm)	Analysis Imperfection Amplitude $\delta_0$ (mm)					
			$\delta_0/t = 0.01$	$\delta_0/t = 0.1$	$\delta_0/t = 0.2$	$\delta_0/t = 0.3$	$\delta_0/t = 0.5$	$\delta_0/t = 0.8$
12,000	2,000	2.0	0.020	0.20	0.40	0.60	1.00	1.60
12,000	2,000	2.5	0.025	0.25	0.50	0.75	1.25	2.00
12,000	2,000	3.0	0.030	0.30	0.60	0.90	1.50	2.40
12,000	2,000	4.0	0.040	0.40	0.80	1.20	2.00	3.20
12,000	2,000	5.0	0.050	0.50	1.00	1.50	2.50	4.00
12,000	2,000	6.5	0.065	0.65	1.30	1.95	3.25	5.20
12,000	2,000	10.0	0.100	1.00	2.00	3.00	5.00	8.00
12,000	2,000	20.0	0.200	2.00	4.00	6.00	10.00	16.00
12,000	2,000	50.0	0.500	5.00	10.00	15.00	25.00	40.00
12,000	2,000	100.0	1.000	10.00	20.00	30.00	50.00	80.00
12,000	2,000	200.0	2.000	20.00	40.00	60.00	100.00	160.00

### 3.3 Geometrically and Materially Nonlinear explicit Imperfection Analysis (GMNIA)

#### 3.3.1 Initial imperfection

Eurocode 설계기준의  $\alpha$  값 계산식인 Eq. (8)에서 사용된  $\Delta w_k/t$  형태로 유한요소 해석에 적용할 초기결합의 크기를 두께의 비율로 Table 3과 같이 선정하였다.

#### 3.3.2 Eurocode design analysis

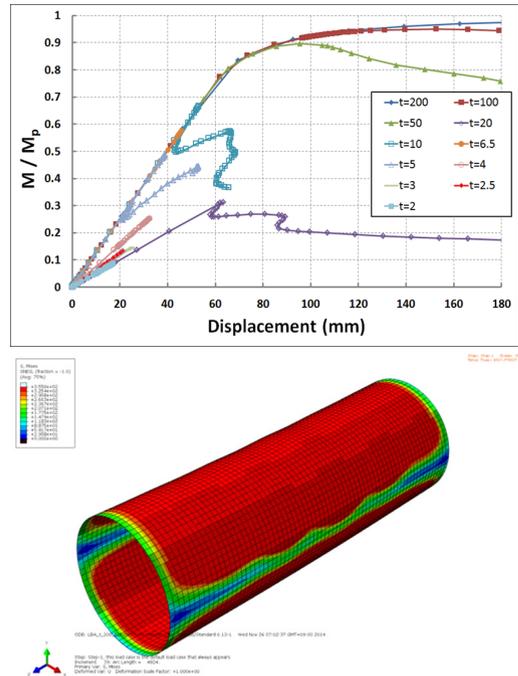
유한요소 해석 모델의 각 두께에 따른 Eurocode 설계 기준에서 제시하고 있는 Eq. (2)~(9)을 사용하여 구한 좌굴강도 계산을 위해 필요한 설계계수들을 Table 4에 나타내었다.

#### 3.3.3 Finite element analysis

재료비선형 해석을 위하여 SM520 강재 ( $\sigma_y = 335 \text{ MPa}$ ,  $E = 205 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ )의 항복응력을 기준으로 Bilinear stress strain curve라 가정한 물성치를 적용하여, Newton Raphson Method를 사용한 기하비선형 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 초기결합의 크기가 ( $\delta_0/t = 0.1$ )일 때의 끝단의 변위와 휨 좌굴강도를 소성모멘트( $M_p$ )로 일반화시킨 그래프와 전단면이 항복할 때의 응력분포를 나타낸 것이다.

Fig. 5a와 같은  $\lambda$ (Relative slenderness)에 따른 좌굴강도 곡선 그래프로는 초기결합에 따른 좌굴강도 감소 추이를 확인하기 어려워, Fig. 5b와 같이 J. M. Rotter(2011)[4]가 제안한 수정 좌굴강도곡선으로 나타내 보았다.

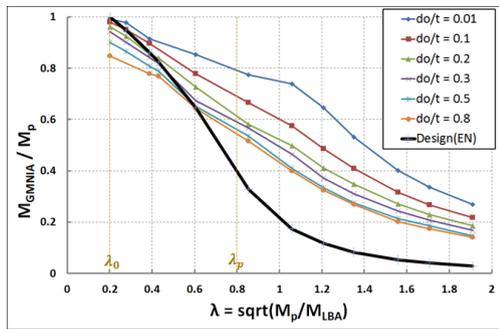


[Fig. 4] Finite element analysis (GMNIA)

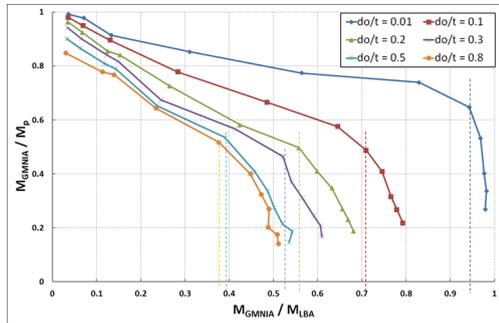
탄성좌굴강도에 초기결합의 영향을 고려하는 계수인  $\alpha$ 의 관계식( $M_{GMNIA} = \alpha M_{LBA}$ )을 이용하면 일정 세장비 이후의 탄성좌굴영역에 도달하면 초기결합 크기에 따른 특정  $\alpha$  값에 의해 좌굴강도가 결정된다. Fig. 5b의 그래프에서 기울기가 급격히 변화하는 부분의 x축 값을  $\alpha$ 라 산정하였다. 초기결합의 크기에 따라 수정된  $\alpha'$  값을 Eurocode 설계식에 반영하여, 각 초기결합의 크기에 따라 유한요소 해석 결과와 비교해 본 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

[Table 4] Eurocode design parameter

L (mm)	R (mm)	t (mm)	Mp (N·m)	Mcr (N·m)	$\lambda$	$\Delta w_k$	$\alpha$	$\beta$	$\lambda_p$	MEuro (N·m)
12,000	2,000	2.0	1.136E+07	3.116E+06	1.90937	3.953	0.1017	0.60	0.5043	3.170E+05
12,000	2,000	2.5	1.420E+07	4.869E+06	1.70779	4.419	0.1161	0.60	0.5388	5.655E+05
12,000	2,000	3.0	1.704E+07	7.011E+06	1.55900	4.841	0.1290	0.60	0.5680	9.047E+05
12,000	2,000	4.0	2.272E+07	1.246E+07	1.35013	5.590	0.1515	0.60	0.6154	1.888E+06
12,000	2,000	5.0	2.840E+07	1.948E+07	1.20759	6.250	0.1706	0.60	0.6531	3.323E+06
12,000	2,000	6.5	3.692E+07	3.291E+07	1.05913	7.126	0.1949	0.60	0.6981	6.416E+06
12,000	2,000	10.0	5.680E+07	7.790E+07	0.85390	8.839	0.2386	0.60	0.7723	1.858E+07
12,000	2,000	20.0	1.136E+08	3.095E+08	0.60582	12.500	0.3146	0.60	0.8869	7.333E+07
12,000	2,000	50.0	2.840E+08	1.889E+09	0.38772	19.764	0.4128	0.60	1.0159	2.448E+08
12,000	2,000	100.0	5.680E+08	7.353E+09	0.27794	27.951	0.4752	0.60	1.0900	5.382E+08
12,000	2,000	200.0	1.136E+09	2.826E+10	0.20050	39.528	0.5232	0.60	1.1437	1.136E+09

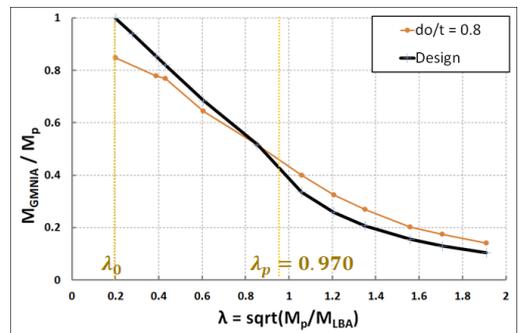
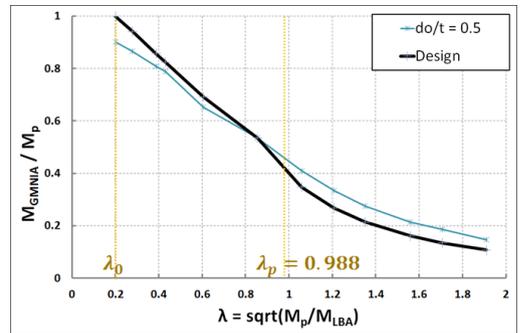
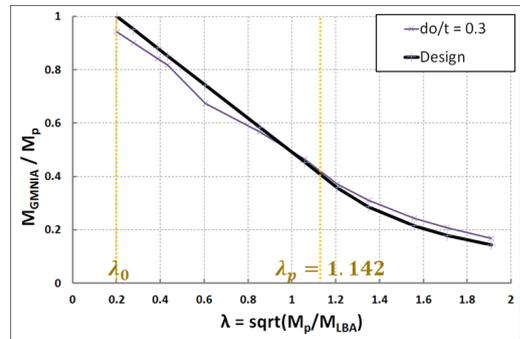
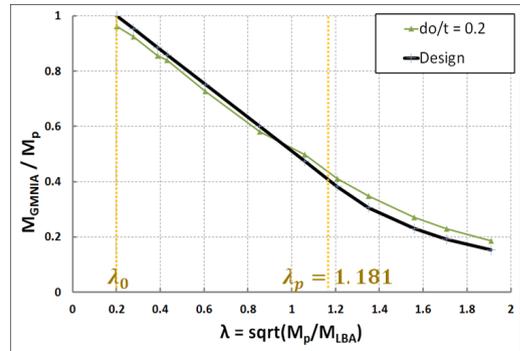


(a)



(b)

[Fig. 5] GMNIA results



[Fig. 6] Modified buckling curves

[Table 5] Compare with FEM results(MFEM) and Eurocode buckling strength(MEuro)

R/t	MEuro (N·m)	δ0/t = 0.01		δ0/t = 0.1		δ0/t = 0.2		δ0/t = 0.3		δ0/t = 0.5		δ0/t = 0.8	
		MFEM (N·m)	MEuro/ MFEM										
1000	3.17E+05	3.05E+06	10.4%	2.47E+06	12.8%	2.12E+06	14.9%	1.90E+06	16.7%	1.67E+06	19.0%	1.59E+06	19.9%
800	5.65E+05	4.78E+06	11.8%	3.79E+06	14.9%	3.26E+06	17.4%	2.95E+06	19.2%	2.64E+06	21.4%	2.48E+06	22.8%
666.7	9.05E+05	6.85E+06	13.2%	5.37E+06	16.8%	4.60E+06	19.7%	4.15E+06	21.8%	3.65E+06	24.8%	3.42E+06	26.4%
500	1.89E+06	1.21E+07	15.6%	9.30E+06	20.3%	7.89E+06	23.9%	7.06E+06	26.8%	6.25E+06	30.2%	6.11E+06	30.9%
400	3.32E+06	1.84E+07	18.1%	1.38E+07	24.0%	1.17E+07	28.5%	1.05E+07	31.6%	9.50E+06	35.0%	9.20E+06	36.1%
307.7	6.42E+06	2.73E+07	23.5%	2.12E+07	30.2%	1.84E+07	35.0%	1.72E+07	37.4%	1.51E+07	42.6%	1.48E+07	43.5%
200	1.86E+07	4.40E+07	42.3%	3.78E+07	49.2%	3.30E+07	56.2%	3.22E+07	57.7%	3.04E+07	61.2%	2.93E+07	63.3%
100	7.33E+07	9.69E+07	75.7%	8.84E+07	82.9%	8.25E+07	88.9%	7.66E+07	95.8%	7.41E+07	99.0%	7.31E+07	100.3%
40	2.45E+08	2.60E+08	94.2%	2.55E+08	96.2%	2.43E+08	100.7%	2.39E+08	102.5%	2.30E+08	106.6%	221072000	110.7%
20	5.38E+08	5.56E+08	96.9%	5.39E+08	99.8%	5.25E+08	102.4%	5.12E+08	105.1%	4.92E+08	109.4%	-	-
10	1.14E+09	1.13E+09	100.7%	1.11E+09	101.9%	1.09E+09	103.8%	1.07E+09	106.1%	1.02E+09	111.0%	9.63E+08	117.9%

[Table 6] Compare with FEM results(MFEM) and modified Eurocode buckling strength(M'Euro)

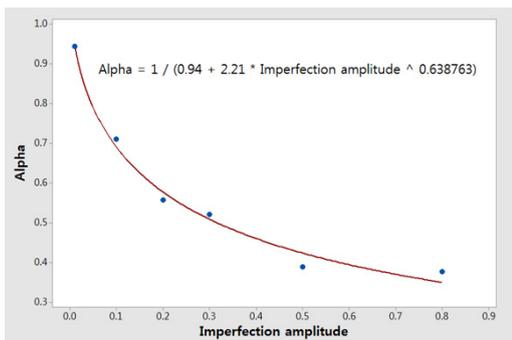
R/t	δ0/t = 0.01		δ0/t = 0.1		δ0/t = 0.2		δ0/t = 0.3		δ0/t = 0.5		δ0/t = 0.8	
	MFEM (N·m)	M'Euro										
1000	2.94E+06	3.05E+06	2.21E+06	2.47E+06	1.74E+06	2.12E+06	1.63E+06	1.90E+06	1.22E+06	1.67E+06	1.17E+06	1.59E+06
	96.3%		89.5%		81.9%		85.6%		72.9%		73.7%	
800	4.59E+06	4.78E+06	3.46E+06	3.79E+06	2.72E+06	3.26E+06	2.54E+06	2.95E+06	1.90E+06	2.64E+06	1.83E+06	2.48E+06
	96.0%		91.1%		83.3%		86.0%		71.8%		74.1%	
666.7	6.61E+06	6.85E+06	4.98E+06	5.37E+06	3.91E+06	4.60E+06	3.66E+06	4.15E+06	2.74E+06	3.65E+06	2.64E+06	3.42E+06
	96.6%		92.6%		85.0%		88.1%		74.9%		77.1%	
500	1.10E+07	1.21E+07	8.85E+06	9.30E+06	6.95E+06	7.89E+06	6.50E+06	7.06E+06	4.86E+06	6.25E+06	4.69E+06	6.11E+06
	91.0%		95.2%		88.2%		92.2%		77.8%		76.8%	
400	1.55E+07	1.84E+07	1.32E+07	1.38E+07	1.09E+07	1.17E+07	1.02E+07	1.05E+07	7.60E+06	9.50E+06	7.34E+06	9.20E+06
	84.6%		95.7%		93.1%		96.5%		80.0%		79.7%	
307.7	2.27E+07	2.73E+07	2.01E+07	2.12E+07	1.75E+07	1.84E+07	1.67E+07	1.72E+07	1.28E+07	1.51E+07	1.24E+07	1.48E+07
	83.1%		94.7%		95.4%		97.4%		85.2%		84.0%	
200	4.01E+07	4.40E+07	3.71E+07	3.78E+07	3.41E+07	3.30E+07	3.31E+07	3.22E+07	3.04E+07	3.04E+07	2.93E+07	2.93E+07
	91.3%		98.2%		103.1%		103.0%		100.0%		100.0%	
100	9.29E+07	9.69E+07	8.92E+07	8.84E+07	8.54E+07	8.25E+07	8.42E+07	7.66E+07	7.85E+07	7.41E+07	7.77E+07	7.31E+07
	95.9%		100.8%		103.5%		110.0%		106.0%		106.3%	
40	2.60E+08	2.60E+08	2.56E+08	2.55E+08	2.51E+08	2.43E+08	2.50E+08	2.39E+08	2.43E+08	2.30E+08	2.42E+08	2.21E+08
	100.1%		100.5%		103.4%		104.7%		106.0%		109.7%	
20	5.48E+08	5.56E+08	5.45E+08	5.39E+08	5.41E+08	5.25E+08	5.40E+08	5.12E+08	5.34E+08	4.92E+08	5.34E+08	-
	98.6%		100.9%		103.0%		105.4%		108.6%		-	
10	1.14E+09	1.13E+09	1.14E+09	1.11E+09	1.14E+09	1.09E+09	1.14E+09	1.07E+09	1.14E+09	1.02E+09	1.14E+09	9.63E+08
	100.7%		102.0%		103.8%		106.1%		111.0%		117.9%	

초기결함의 크기가 작은 경우( $\delta_0/t = 0.01$ ) Eurocode의 강도 식은 실제 좌굴강도의 최소 10.4%에 미치는 매우 보수적인 강도를 나타낸다. 반면, 초기결함의 크기가 커질수록 탄소성 거동 구간의 설계 강도가 해석강도보다도 크게 제시되어 있다. 설계 시 고려한 하중에 의해서도 탄소성 좌굴파괴가 발생 할 가능성을 가지고 있다.

Eurocode에서 제안하는 초기결함 크기처럼 두께에 따라 일정하게 적용하는 것이 아니라 초기결함의 크기에 따른  $\alpha'$  값을 적용한 강도 식을 유한요소해석과 Table 6에서 비교해 보았다.  $\alpha'$  값으로 인하여 탄소성 거동구간을 결정하는  $\lambda_p$ 의 변화로 인하여 탄성좌굴구간에서는 실제 강도와 보다 유사한 좌굴강도를 구할 수 있었으며 탄성거동구간은 Table 6에서 파란색으로 표기하였다. 그러나 EN 1993-1-6 ANNEX D에서 제시하고 있는  $\lambda_0 = 0.2$ 의 조건에 의하여 비탄성좌굴 거동구간이 결정되어 있고,  $\eta = 1$  으로 인해 선형보간 식이 구성되어 탄성거동구간은  $\alpha'$  값으로 보정이 가능하나 탄성 및 탄소성 거동 구간은 실제 강도보다 큰 좌굴강도로 계산되는 한계가 있다.

다양한 초기결함에 따른 기하·재료 비선형성을 반영할 수 있는 수정된  $\alpha'$  값을 사용하기 위해, 초기결함의 크기( $\delta_0$ )만을 알고 있다면 간략히  $\alpha'$  값을 구할 수 있는 식을 제안하였다.

$$\alpha' = \frac{1}{0.94 + 2.21(\delta_0/t)^{0.638763}}$$



[Fig. 7] Regression analysis for modified imperfection reduction factor

초기결함이 작은 경우 수정된 좌굴강도 곡선이 대부분의 구간에서도 FEM해석 값을 수용할 수 있으나, 초기

결함의 크기가 커질수록 탄성좌굴 구간이 아닌 구간에서 FEM해석 결과보다 큰 강도로 나타나게 된다. 이러한 부분은 초기결함이 커질수록 Eurocode에서 제시한  $\lambda_0 = 0.2$ 에서 소성모멘트에 도달하지 못하여 발생하는 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 초기결함을 반영한 기하·재료비선형 좌굴해석을 수행하여 초기결함의 크기에 따른 수정된  $\alpha'$  값(modified imperfection reduction factor)을 제안하였고, 이러한 매개변수 해석을 가지고 다양한 초기결함의 크기에 따른 수정된  $\alpha'$ 를 구하기 위한 회귀분석 제안식을 제시하였다. 수정된  $\alpha'$  값을 Eurocode 설계식에 적용한다면 특정 초기결함의 크기에 따른 원통형 쉘의 탄성좌굴강도를 실제 좌굴강도와 보다 유사한 결과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

초기결함의 크기가 작은 경우  $\lambda_0 = 0.2$ 에서  $M_p$ 에 근접한 좌굴강도를 발휘하지만, 초기결함의 크기가 큰 경우  $\lambda_0 = 0.2$ 에서 전단면이 항복하지 못하여 수정된 좌굴강도 곡선이 실제 거동을 모두 반영하지 못하는 것으로 보아 초기결함에 따른  $M_p$  값 산정을 위한 합리적인  $\lambda_0$  값에 대한 추가연구가 필요한 것으로 판단된다.

#### References

- [1] Sotiria Houliara, Spyros A. Karamanos, "Buckling of Thin-Walled Long Steel Cylinders Subjected to Bending", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 133, Issue 1, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4002902>
- [2] Lauren Kougias, "A Study of the Effect of Imperfections on Buckling Capability in Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading", Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering, 2009.
- [3] Tohid Ghanbari Hjazijahani, Hossein Showkati, "Bending Experiments on Thin Cylindrical Shells", Advanced Structured Materials, Vol. 16, p.119-139, 2012.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-22700-4\\_7](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-22700-4_7)
- [4] Comelia Doerich, J. Michael Rotter, "Generalised Capacity Curves for Stability and Plasticity: Application and

Limitations”, Thin-Walled Structures, Vol. 49, p.1132-1140, 2011.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2011.04.005>

- [5] Hartono Yudo, “A Study on the Buckling Strength of Offshore Pipeline Subjected to Bending and External Pressure”, Degree of Doctor of Philosophy in Marine System Engineering at Kyushu University, 2014.
- [6] Hartono Yudo, Takao Yoshikawa, “The Effect of Initial Imperfection on Buckling Strength for Straight and Curved Pipe Under Pure Bending Load”, International Ocean and Polar Engineering g Conference Busan(ISOPE), 2014.
- [7] Anh Tuan Tran, Milan Veljovic, Carlos Rebelo and Luis Sumoes da Sulva, “Resistance of Door Openings in Towers for Wind Turbines”, 3rd-South-East European Conference on Computational Mechanics an ECCOMAS and IACM Special Interest Conference, p.12-14, 2013.
- [8] EN 1993-1-6, “Design of steel structures”, 2007
- [9] DNV-RP-C202, “Buckling Strength of Shells”, 2013.
- [10] DNV-OS-C401, “Fabrication and testing of offshore structures”, 2010.

**장 민 서(Min-Seo Jang)**

[정회원]



- 2011년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학부 (공학사)
- 2014년 2월 : 고려대학교 대학원 건축사회환경공학과 (박사수료)

<관심분야>  
토목구조공학, 구조해석

**박 종 섭(Jong-Sup Park)**

[정회원]



- 1994년 2월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학사)
- 1996년 7월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학석사)
- 2002년 12월 : AUBURN University (공학박사)
- 2005년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 건설시스템공학과 교수

<관심분야>  
구조공학, 교량공학, 강구조좌굴, 유지보수

**이 윤 우(Yun-Woo Lee)**

[준회원]



- 2013년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학부 (공학사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 대학원 건축사회환경공학과 (석박사통합과정)

<관심분야>  
토목구조공학, 구조해석

**강 성 용(Kil-Seo Hong)**

[정회원]



- 2011년 8월 : 상명대학교 건설시스템공학과 (공학사)
- 2013년 8월 : 상명대학교 건설시스템공학과 (공학석사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 일반대학원 건축사회환경공학과 박사과정

<관심분야>  
구조공학, 교량공학, 구조해석

**강 영 종(Young-Jong Kang)**

[정회원]



- 1987년 3월 ~ 1987년 8월 : 한국 전력기술(주) (기술원보)
- 1987년 9월 ~ 1989년 6월 : AUBURN University (Graduate T.A. & R.A.)
- 1993년 3월 ~ 1994년 2월 : 공주대학교 토목공학과 (전임강사, 학과장)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

<관심분야>  
토목구조역학공학, 곡선교량, 강구조좌굴, 유지보수