



항만 및 해양구조용 고강도 내식성 원형강관의 축방향 허용압축응력 산정

오창국¹ · 박장호² · 배두병^{3*}

¹부교수, 국민대학교, 건설시스템공학부, ²교수, 아주대학교, 건설시스템공학과, ³교수, 국민대학교, 건설시스템공학부

Allowable Axial Stress Estimation of Corrosion Resistance Steel Tubes for Port and Offshore Structures

Oh, Chang Kook¹, Park, Jang Ho², Bae, Doobyong^{3*}

¹Associate Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

²Professor, Dept. of Civil Systems Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

³Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

Abstract - Corrosion resistance steel has been widely used for port and offshore structures exposed to harsh coastal and oceanic environments, due to lower corrosion rate. New higher strength corrosion resistance steel tubes named STKM500 in KS D 3300 were recently developed by domestic technology and expected to replace foreign ASTM A690 steel. In this study, tensile test results are included to show higher yield and tensile strength of STKM500. Then, buckling test results obtained from 2m, 6m, and 12m steel tubes are demonstrated, based on which an allowable axial compressive stress curve for STKM500 steel tubes is suggested.

Keywords - Allowable Axial Compressive Stress, STKM500, High Strength Corrosion Resistance Steel Tubes, Buckling Test, Circular Hollow Sections

1. 서론

항만 시설물, 해상풍력발전 플랜트, 장대교량 등 해양 환경에 노출되는 구조물이 점차 증가함에 따라, 기존 구조용 강재 대비 부식속도가 느린 항만 및 해양구조물 전용 내식성강(또는 내해수강)에 대한 필요성이 점차로 증가하고 있다. 해상 강구조물은 부식 환경에 직접 노출될 뿐 아니라, 주기적 재도장 또는 재방식 처리가 용이하지 않아 일반 구조용 강재와 비교할 때 부식 속도가 느린 내식성 강재의 사용이 필수적이다. 내식성강은 일반 강재에 Ni, Cu, P, Cr 등을 첨가하여 해수환경에서 내식성을 향상시킨 강재를 일컫는다^{[1],[2],[3]}.

최근까지 국내에서는 STK400 및 STK490 강재와 국외에서 개발된 ASTM A690 강재를 주로 사용해 왔는데, 특별히 ASTM A690 강재는 비말대 및 간만대에서 일반 탄소강 대비 2배 정도 내식성이 우수한 것으로 알려져 있다^[4]. 최근 국내에서 A690 강재보다 경제적이고 고강도인 내해수성 강재를 개발하여 KS 규격(KS D 3003^[2]과 KS D 3300^[3])에 등록하게 되었고, 이 강재(KS 규격을 따라 이하 STKM500으로 칭함)를 사용하게 되면 A690 강재와 비교할 때 강재의 중량을 줄이면서도 유사하거나 우월한 부식 성능을 확보할 수 있게 되었다^{[1],[5]}.

개발된 STKM500을 사용하여 원형강관을 제작하면, H-형강, 정사각형 단면등과 비교할 때, 단면의 임의축에 대한 휨강성이 동일할 뿐 아니라, 같은 중량의 H형강이나 사각형 강관보다 우수한 단면성능을 가지게 된다^[6].

이 연구에서는 새롭게 개발된 고강도 내해수성 강재인 STKM500 시험편을 이용한 인장실험을 수행하여 항복강도, 인장강도를 측정하였고, D508×12t(지름 508mm, 두께 12mm)

Note.-Discussion open until February 28, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 23, 2016; revised June 1, 2016; approved on June 14, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-910-4697 Fax. +82-2-910-4939

E-mail. dbbae@kookmin.ac.kr

의 강관을 세장비에 따라 2m, 6m, 12m의 3 종류로 제작한 뒤, 강관 압축실험을 통해 원형강관의 축방향 허용압축응력을 산정하였다. 특별히 12m 시험체에 대해서는 유한요소해석을 이용한 비선형 좌굴해석을 추가로 수행하여 결과를 검증하였고, 국내외 여러 설계기준에서 제시하고 있는 축방향 허용압축응력곡선과의 비교를 통해 적절한 강도곡선을 제안하였다.

교량 및 건축구조 설계와는 달리 해양 강구조물의 경우에는 항만 및 어항 설계기준(2014)^[7]에 명시된 바와 같이 허용응력설계법을 따르기 때문에, 본 연구에서는 허용압축응력곡선이 제안되었다. 하중저항계수설계법 등이 적용되는 경우에는 적절한 안전율을 곱해줌으로써 변환이 가능하다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저, 2장에서 개발된 STKM500 강재의 기계적 성질을 기술한 후, 3장에서 기존 설계기준에 제안된 축방향 허용압축응력식을 비교한다. 4장에서는 STKM500 강관의 축방향압축실험 결과와 유한요소해석 결과를 기반으로 새로운 허용압축응력곡선을 제안한다.

2. 고강도 내식성강의 기계적 성질

새롭게 개발되어 KS D 3300에 수록된 고강도 내해수강 STKM500의 기계적 성질은 Table 1과 같다^{[2],[3]}. 항복강도와 인장강도는 각각 380MPa이상과 500MPa이상이고, 허용응력은 230MPa이상이다.

STKM500 강재는 Table 1에 나타난 바와 같이 항복강도와 인장강도, 허용응력이 HSB500과 동일한데, 이는 항만 및 어항 설계기준(2014)^[7]해설에 기술된 것처럼 도로교설계기준(2010)^[8]에 정의된 HSB500의 허용응력을 준용하기 때문이다. 국내 항만 및 해양구조에서 많이 사용되는 STK490이나 해외에서 개발되어 사용되는 A690 강재와 비교할 때는 STKM500의 항복강도와 인장강도가 높은 것을 확인할 수

Table 1. Mechanical properties of STKM500 (MPa)

	Structural steel		Corrosion Resistance Steel	
	STK490	HSB500	A690	STKM500
Tensile stress	490	500	485	500
Yield stress	315	380	345	380
Allowable stress	190	230	-	230

Table 2. Tensile test results of SKTM500 (MPa)

	Yield Stress	Tensile Stress
Average	508	574
Standard Deviation	14.06	11.85

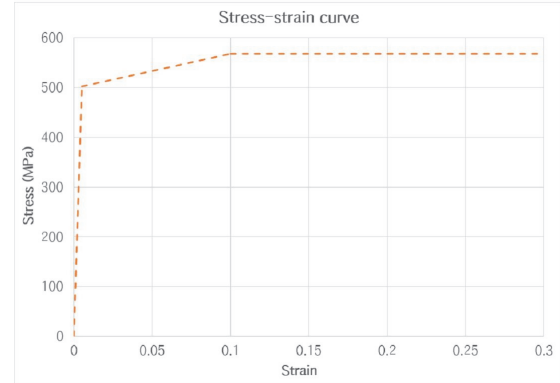


Fig. 1. Stress-strain curve of STKM500

있다. 뿐만 아니라, 비말대에서 일반 강재 대비 60% 수준의 부식속도를 적용할 수 있어 더욱 경제적이다^{[1],[5],[7]}.

Table 1과 같이 기준에 명시된 강도는 최소 강도로써 실제 제작되는 강재는 항복강도와 인장강도가 일반적으로 규정강도보다 다소 높다. 재료의 강도 차이로 인하여 압축강도 실험에 미치는 영향을 제거하기 위해 본 연구에서는 소재인장실험을 통해 획득한 물성치를 사용하였다.

소재 인장실험은 12개의 STKM500 시편을 KS B 0801의 5호 시험편 크기로 제작하여 수행하였다. 12개 인장시험편은 6개의 강관마다 길이방향으로 2개씩 채취하였으며, Table 2와 같이 총 12개의 시편에 대한 항복강도 및 인장강도의 평균값은 약 508MPa과 574MPa이었고, 탄성계수는 약 204GPa이었다. 인장실험의 항복강도 및 인장강도 결과값은 규정강도보다 각각 30%이상과 14%이상 크게 측정되었다.

추후 유한요소 해석 등에는 소재 인장실험에서 얻은 항복강도 및 인장강도의 평균값(Table 2의 값)을 사용하였다. Fig. 1에는 소재 인장실험에서 얻은 측정값을 반영하여 유한요소 해석에 사용된 응력-변형률 선도를 도시하였다. 총 12개의 측정결과 중 항복응력이 평균값과 제일 가까운 실험 데이터(506MPa인 경우)의 응력변형률 곡선을 사용하였다.

3. 설계기준에 제안된 축방향 허용압축응력식

이 장에서는 국부좌굴을 고려하지 않는 원형강관의 축방

항 허용압축응력에 대해 설계기준에서 제시되어 있는 식들을 비교, 분석한다.

강관구조에서는 허용압축응력을 산정할 때 전체좌굴과 국부좌굴에 대한 축방향 허용압축응력을 구하여 그 중 작은 값을 써서 부재를 설계한다^{[7],[8]}. 국부좌굴에 대한 허용압축응력은 강관 두께에 대한 반지름의 비인 R/t 의 함수인데, R/t 의 값이 작은 범위에서는 허용응력값을 그대로 사용하고, R/t 의 값이 어느 정도 이상인 경우에는 허용응력값을 직선적으로 감소시킨다^[8].

본 연구에서 실험 및 유한요소해석을 위해 사용된 강관의 경우, 새롭게 개발된 강재이기 때문에 국부좌굴에 대해 적용할 수 있는 허용압축응력식이 없다. 이에 따라 적절한 비교를 위해 HSB500과 A690강재의 식을 참고하였다^[8].

STKM500 강관의 $R/t = 21.167$ 로 도로교설계기준(2010)^[8]을 따르면, HSB500의 경우($R/\alpha t \leq 30$)나 A690의 경우($R/\alpha t \leq 35$)와 비교할 때, 두 가지 경우 모두 허용응력값을 그대로 사용할 수 있다(즉, 국부좌굴을 고려하지 않는다). 통상적으로 강관은 국부좌굴 영역에 해당하지 않도록 제작하는 것이 보통이다.

3.1 도로교설계기준(2010), Eurocode3(1993)

허용응력설계법에 의한 도로교설계기준(2010)^[8]의 압축부재의 내하력 곡선은 Eurocode3(1993)^[9]의 내하력 곡선과 거의 일치한다. 도로교설계기준(2010)^[8]에는 구조용 강재의 허용축방향압축응력 F_a (MPa)를 다음의 식에 의해 계산된 값으로 규정하고 있다.

$$F_a = f_{avg} \cdot f_{cal} / f_{cao} \quad (1)$$

여기서, f_{avg} , f_{cao} 는 각각 도로교설계기준(2010)^[8] 표 3.3.2에 표시된 국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향압축응력(MPa)과 그 상한값(MPa)이며, f_{cal} 은 도로교설계기준(2010)^[8]의 3.4.2.1, 3.4.2.2 및 3.4.2.3에 규정한 국부좌굴에 대한 허용압축응력(MPa)값이다.

식 (1)의 f_{avg} 값은 다음과 같다.

$$f_{avg} = \begin{cases} 230 & \left(\frac{L}{r} \leq 14.6 \right) \\ 230 - 1.72 \left(\frac{L}{r} - 14.6 \right) & \left(14.6 < \frac{L}{r} \leq 73.0 \right) \\ \frac{1,200,000}{4,100 + (L/r)^2} & \left(73.0 < \frac{L}{r} \right) \end{cases} \quad (2)$$

여기서, L 과 r 은 각각 부재의 유효좌굴길이(mm)와 부재 종단면의 단면회전반경(mm)이다.

f_{cal} 은 강관의 경우 도로교설계기준(2010)^[8] 표 3.13.4에 규정되어 있는데, 각 강종에 대해 판두께(mm)와 R/t 값에 따라 규정되어 있다. f_{cao} 값은 국부좌굴을 고려하지 않는 허용축방향압축응력의 상한값으로, 본 연구의 경우 $f_{cal} = f_{cao}$ 가 된다.

3.2 강구조설계기준(2003), API(2000), AISC(1989)

허용응력설계법에 의한 강구조설계기준(2003)^[10]에서 규정된 강관부재의 허용압축응력은 API(2000)^[11]과 AISC(1989)^[12]의 내용과 동일하며, 강관부재의 허용압축응력은 다음의 식에 의해 계산된 값으로 규정하고 있다.

$$F_a = \begin{cases} \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y & \left(\frac{KL}{r} \leq C_c \right) \\ \left[\frac{5}{3} + \frac{3KL/r}{8C_c} - \frac{(KL/r)^3}{8C_c^3} \right] & \left(C_c < \frac{KL}{r} < 200 \right) \\ \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} & \left(C_c < \frac{KL}{r} < 200 \right) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, F_a 는 압축부재의 기본허용응력(MPa), F_y 는 항복강도(MPa), K 는 유효길이계수, L 은 부재의 길이(mm), r 은 단면의 회전반경(mm), $C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}}$ 로 탄성좌굴과 비탄성좌굴을 구분하는 한계세장비이다.

4. 항만 및 해양구조용 고강도 내식성 원형강관의 축방향 압축실험 및 유한요소해석

4.1 고강도 내식성 원형강관의 축방향 압축실험

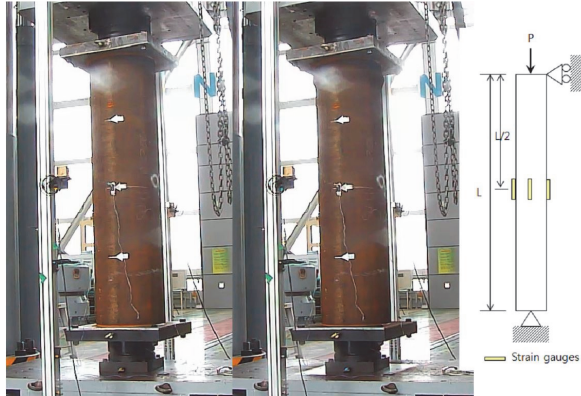
STKM500 원형 강관의 축방향 압축강도 산정을 위하여, 직경이 508mm이고 두께가 12mm인 D508×12t 강관(Corrosion

Table 3. Section properties of CRST

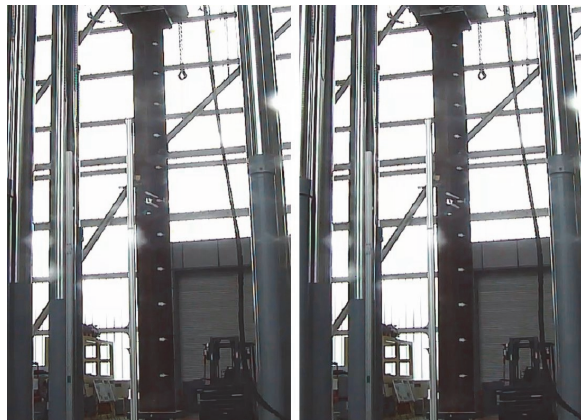
Unit Weight	1439.96 N/m
Area	187×10 ² mm ²
Moment of Inertia	575×10 ⁶ mm ⁴
Section Modulus	227×10 ⁴ mm ³

Resistance Steel Tube, CRST)을 제작하여 축방향 압축실험을 수행하였다. 제작된 강관의 단면 특성값은 Table 3의 값과 같다^{[2],[3]}.

단면의 치수, 특별히 직경과 두께의 비는 국부좌굴이 발생하지 않도록 정해졌다. 강관의 길이는 2m, 6m, 12m의 3종류로 제작하였고, 각 길이당 3개씩의 강관을 사용하여 압축실험을 수행한 후 평균값을 구하였다. 실험장비와 재료가 허용하는 범위 내에서 다양한 세장비에 대한 압축강도를 측정



(a) 2m CRST (undeformed(left) and deformed(right) shape) and gauge locations



(b) 6m CRST (undeformed(left) and deformed(right) shape)

Fig. 2. Axial compression test of 2m and 6m CRSTs

Table 4. Max. axial load of CRST (2m, 6m)

Length	Max. axial load (kN)	Stress ratio*
2m	9,627	1.02
	9,726	1.06
	9,490	1.02
6m	9,632	0.99
	9,181	0.98
	9,312	0.94

하고자 계획했다. 실험 수행시 단순지지 조건(즉, 유효길이계수 $K=1$)을 구현하기 위해 강관의 양쪽 지점에 반지름이 $R=(D/2)$ 인 구형체를 사용하였다.

실험체의 초기 결함을 최소화하기 위해 제작하는데 주의를 기울였으나, 원형 강관의 제작 오차, 판 두께의 불균일한 오차, 경계조건의 불완전한 구현, 하중의 편심, 설치 오차 등 직접 외형을 측정하여 구하기 어려운 오차가 불가피하게 포함되었을 것이며, 그 크기는 파악할 수 없는 한계가 있다. 단, 유한요소해석에서는 실험체 길이의 1/500인 $L/500$ 만큼의 초기 결함이 부재의 중앙점에서 sine 형상으로 발생한 것으로 가정하여 해석을 수행하였다^[13].

먼저, 길이 2m와 6m의 실험체를 이용하여 압축강도 실험을 진행하였다. 동일한 재원을 가진 시험체를 길이별로 각각 3개씩 제작하여 압축실험을 진행하였다. 1,000톤 UTM을 활용하여 압축력을 가했고, 힌지(hinge)-힌지 조건을 구현하였으며, 응답측정을 위해 LVDT와 변형률 게이지를 이용하여 변형률 및 변위를 측정하였다.

압축실험을 통해 측정된 극한하중값(kN)은 Table 4와 같다. 축방향 하중의 증가와 비례하여 변위도 증가하다가 축방향 하중이 최댓값에 가까워질 때 비선형 거동을 관찰할 수 있었다. Table 4에서 응력비는 식 (4)와 같고, 그 값들이 거의 1에 가깝다. 이는 각 실험체들이 선형좌굴을 유발하는 임계하중(critical load)에 도달하기 전에 먼저 항복하였음을 의미한다고 판단된다.

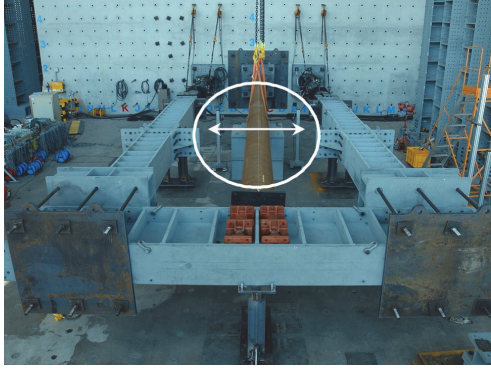
$$\text{Stress ratio} = \frac{\text{Max. axial load}}{\text{Area} \times F_y} \quad (4)$$

12m 실험체의 경우에는 수직으로 실험체를 설치한 후 압축하중을 가하는 것이 불가능하여 Fig. 3과 같이 수평으로 눕혀서 실험을 진행하였다. 가용한 가력기(actuator) 중 용량이 가장 큰 300톤 가력기 2개를 설치하여 총 600톤을 가력할 수 있도록 하였다.

편심이 작용하지 않도록 부재 끝단에 단면적이 충분한 보를 연결하고, 보의 플랜지 부분에 변형이 발생하여 압축력의

Table 5. Max. axial load of CRST (12m)

Length	Max. axial load (kN)	Stress ratio*
12m	5,658	0.60
	5,653	0.61
	5,664	0.61



(a) 12m CRST Test set up (installed support at the middle (circle) and unconstrained degree of freedom (arrow))



(b) Two 300 tonf actuators

Fig. 3. Axial compression test of a 12m CRST

손실이 발생하지 않도록 스크류잭을 설치했다. 부재의 양단에는 2m, 6m 실험체와 동일하게 반지름이 $R = (D/2)$ 인 구형체를 사용하여 힌지 조건($K=1$)을 구현하였다.

길이가 긴 부재를 수평으로 설치하면 자중에 의해 과도한 처짐이 하중 재하(load) 전에 발생하여 압축강도 산정에 영향을 줄 수 있기 때문에, 부재의 중앙부 6m지점에 부재의 처짐을 방지할 뿐 아니라 부재와 직각 방향(Fig. 3에 도시한 화살표 방향)으로만 이동이 가능하도록 지점을 추가로 설치하였다(Fig. 3의 타원 부분 참조). 부재 직각 방향의 변형을 가능하게 하여 힌지-힌지의 경계조건을 갖는 원형 강관의 기본 모드 형상(fundamental mode shape)인 사인함수의 형상이 구현될 수 있도록 하였다.

12m 강관의 좌굴응력($F_{cr} = \frac{F_a}{0.6}$)을 3장에 기술한 도로교 설계기준(2010)(또는 Eurocode3)과 허용응력설계법에 의한 강구조설계기준(2003) (또는 API(2000), AISC(1989))에 규정된 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 산정하면, 각각 230MPa와 263MPa이다. 두 값 중 큰 값을 이용하여 산정한 최대축방향하중(Max. axial load)은 4,918kN이 된다. 이 값은 비

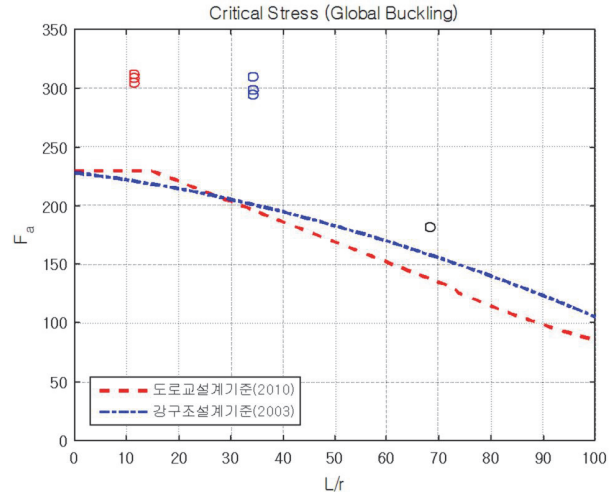


Fig. 4. Load-displacement curve of nonlinear buckling

선형좌굴을 유발할 수 있는 최소값이라는 점에 유의해야 한다. 이에 따라, 압축실험은 가력기의 최대 용량의 95% 이상인 5,645kN 이상의 하중까지 재하하였다.

Table 5에 최대축방향 하중값과 응력비를 나타냈다. 최대 축방향 하중이 재하되는 동안 좌굴이나 항복 현상은 관찰되지 않았기에 허용압축응력에 관한 설계기준 규정^{[7],[8],[9],[10],[11],[12]}을 만족하고 있다고 판단된다.

Fig. 4에 도로교설계기준(2010)^[8](또는 Eurocode3^[9])과 허용응력설계법에 의한 강구조설계기준(2003)^[10](또는 API, 2000^[11]; AISC, 1989^[12])에 규정되어 있는 허용압축응력곡선과 실험에서 측정된 허용압축응력을 도시하였다. Fig. 4에 원으로 표시된 데이터는 실험에서 측정된 최대축방향하중(P_{max})을 이용하여 다음의 식을 이용하여 산정하였다.

$$F_a = F_{cr} \times 0.6 = (P_{max}/A) \times 0.6 \quad (5)$$

Fig. 4로부터 STKM500 강관의 경우 도로교설계기준(2010)^[8]과 강구조설계기준(2003)^[10]에 제시된 HSB500강재의 허용압축응력산정식을 준용해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

실제 실험에서 가력기의 최대값이 600톤이어서 좌굴을 관찰할 수 없는 한계가 있어서 비선형 좌굴에 대해서는 유한요소해석 결과를 사용하여 검증하였다.

4.2 고강도 내식성 원형강관의 유한요소해석

12m 강관의 좌굴응력을 산정하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 범용구조해석 프로그램인 ANSYS

를 사용하였다. Fig. 1에 도시한 응력변형률 곡선을 이용하여 항복강도와 극한강도를 각각 508MPa와 574MPa로 하는 삼중선형곡선을 사용하여 재료의 비선형을 고려하였다. 재료비선형과 더불어 기하비선형을 함께 고려하여 비선형 좌굴현상을 구현했다.

부재의 양 끝단은 힌지-힌지로 모델링하였고, 실험체의 경계조건과 해석모델의 조건을 동일하게 하기 위해 부재의 중앙부 6m 위치의 수평방향 변위는 구속하지 않고, 수직방향 변위만 구속했다. 강관은 셀요소를 사용하여 구성하였으며, 셀요소의 한 변의 크기가 50mm를 넘지 않도록 하여 안정된 결과를 얻도록 하였고, 전체 7,680개의 모델을 사용하였다.

도로교설계기준(2010)^[8]에 따르면 $L/r \geq 70$ 인 부재에 대해서 자중을 고려할 것을 권하고 있는데, 본 연구에 사용된 12m 실험체의 경우 $L/r = 68.41$ 로 자중을 고려할 필요가 없지만, 실제 실험환경과 같은 조건으로 해석을 진행하기 위해서 부재의 자중을 함께 고려하여 해석을 진행하였다. 후좌굴 거동(Post-buckling behavior)에 관심이 있는 것은 아니었으므로, 하중제어해석을 진행하였다.

유한요소모델의 초기 결함을 고려하기 위해 고유치 해석을 통해 얻은 1차 좌굴모드의 형상과 동일한 sine 형의 초기 변형을 고려하였다. 자중으로 인한 변형과 더불어 부재의 중앙점에 $L/500$ (L 은 부재의 길이) 크기의 초기 변형을 추가했다. 초기 변형의 크기는 일반적으로 강재 공급사의 사양에 규정되어 있는데, 관 형상의 경우에는 주로 $L/500$ 값을 사용한다^[13]. 제작과정에서 발생할 가능성이 있는 용접에 의한 잔류 응력, 하중의 편심, 물성치 변화 등은 고려하지 않았다.

Fig. 5는 시험체 중앙부의 수평방향 변위와 축방향력을 각각 수평축과 수직축으로 하여 나타낸 유한요소해석 결과이다. 비선형 좌굴해석의 경우, 좌굴하중은 하중-변위 곡선의 수평한 (또는 거의 수평한) 하중값에 해당한다^[13]. Fig. 5의 결과는 6,500kN 이상의 하중이 가해지는 경우 확연한 비선형 거동을 보이고, 최대좌굴하중은 7,500kN~8,000kN 인 것을 확인할 수 있다.

압축실험에서 사용된 가력기의 최대 용량이 600톤이므로, 현재의 실험조건에서는 비선형좌굴하중이 발생할 때까지 가력하는 것은 어렵다는 것을 확인할 수 있다. 실제로, 비선형 좌굴해석의 결과는 초기 결함의 크기 등과 같이 압축부재의 내하력을 감소시킬 수 있는 요인에 따라 달라질 수 있어서, 예를 들어 초기 결함이 커지는 경우 좌굴하중의 값에 큰 영향이 있음을 유의해야 한다^[13].

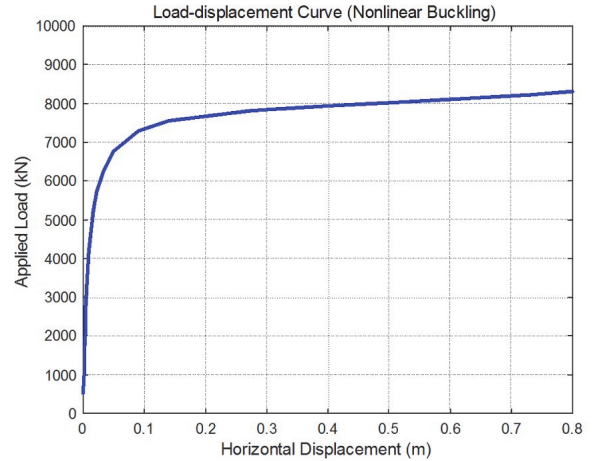


Fig. 5. Load-displacement curve of nonlinear buckling

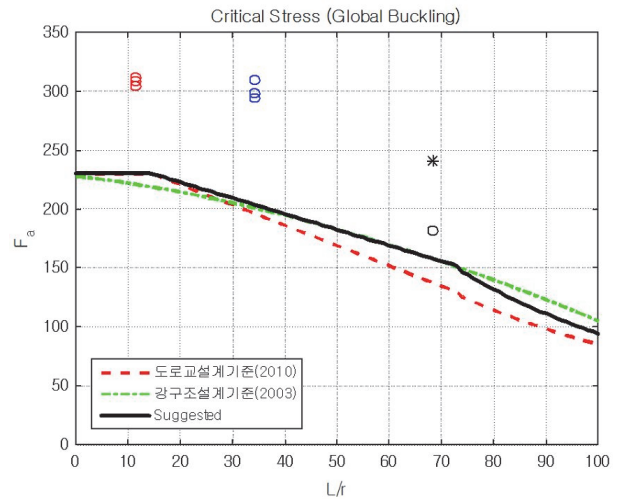


Fig. 6. An analysis result and suggested allowable stress curve

비선형좌굴하중 7,500kN에 대한 허용압축응력은 241MPa 이고, 그 값을 Fig. 6의 허용압축응력곡선에 별표(*)로 도시하였다. 그래프에서 확인할 수 있는 것과 같이 STKM500 강재의 허용압축응력값이 기준에서 제시된 값들을 상회하고 있음을 확인할 수 있다. 참고로, Fig. 6에 원(o)으로 표시된 값들은 Fig. 4에 원으로 표시된 값들과 동일한 값으로 축방향 압축실험에 의해 측정된 허용압축응력값이다.

4.3 STKM500 강재의 축방향 허용응력 곡선식 제안

2m, 6m, 12m STKM500 강관의 압축실험과 12m 강관에 대한 추가 유한요소해석을 통해 Fig. 6과 같이 STKM500 강관의 허용압축응력이 현재의 도로교설계기준(2010)^[8](또는 Eurocode3^[9])에 규정된 HSB500 강재에 대한 축방향 허용

압축응력값(붉은 색 점선)과 허용응력설계법에 의한 강구조 설계기준(2003)^[10](또는 API, 2000^[11]; AISC, 1989^[12])에 규정되어 있는 $F_y = 380\text{MPa}$ 인 HSB 500 강재의 허용압축응력값(녹색 일점 쇄선)의 최대값을 모두 상회하고 있음을 확인할 수 있었다. L/r 값이 작을 때는 도로교설계기준(2010)에 규정된 값이 더 크고, 반대로 L/r 값이 클 때는 허용응력설계법에 의한 강구조설계기준(2003)에 규정된 값이 더 큰 점에 유의하라.

Fig. 6에 나타난 결과와 더불어 시간이 지날수록 강재의 제조기술이 발전함에 따라 허용응력의 임계값(critical stress) 또한 향상되고 있는 점을 고려하면(예, 항만 및 어항설계기준(2014)^[7]의 STKM490의 허용인장응력이 2005년 185MPa에서 2014년 190MPa로 상향 조정됨), STKM500 강관의 축방향 허용압축응력은 연관된 설계기준에 규정되어 있는 값들의 상향 한계값을 사용해도 무방할 것으로 판단된다.

이에 따라 다음과 같은 축방향 허용압축응력식을 제안하였다.

$$F_a = \begin{cases} 230 & \left(\frac{L}{r} \leq 14.6 \right) \\ 230 - 1.34 \left(\frac{L}{r} - 14.6 \right) & \left(14.6 < \frac{L}{r} \leq 73.0 \right) \\ \frac{1,200,000}{2700 + (L/r)^2} & \left(73.0 < \frac{L}{r} \right) \end{cases} \quad (6)$$

제안한 식은 도로교설계기준(2010)^[8]에 규정된 식과 유사한 형태로 표현해서 일관성을 유지하도록 하였으며, L/r 값이 73보다 큰 영역에서는 현재 실험 및 해석 결과가 없는 점을 고려하여 도로교설계기준(2010)^[8]과 허용응력설계법에 의한 강구조설계기준(2003)^[10]의 중간값을 갖도록 제안하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 새롭게 개발된 항만 및 해양구조용 고강도 내식성 원형강관 STKM500의 허용축방향 압축응력에 대한 산정식을 제시하기 위해 (1) 12개 시편의 소재인장시험을 수행하여 항복강도 및 인장강도를 측정하였으며, (2) 2m, 6m, 12m 길이의 강관을 각각 3개씩 모두 9개를 제작하여 축방향압축실험을 진행하여 최대압축력을 측정하였으며, (3) 비선형좌굴에 대한 유한요소해석을 수행하여 12m 길이 실험체의 최대압축력을

검증한 후 (4) 축방향 허용압축응력 산정식을 제안하였다. 축방향 압축실험 및 유한요소해석 결과에 기반하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) STKM500 강재의 항복강도와 인장강도는 기존 STKM490 또는 ASTM A690 강재의 값들을 상회하며, 규정강도보다도 각각 30%이상 14%이상 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.
- (2) D508×12t 규격을 갖는 STKM500 강관의 축방향 압축실험을 수행한 결과, 길이 2m, 6m, 12m의 경우 모두 축방향 허용압축응력이 도로교설계기준(2010)과 허용응력설계법에 의한 강구조설계기준(2003)에 규정된 축방향 허용압축응력에 비해 높은 것으로 나타났다.
- (3) 특별히 12m 강관의 경우, 자중과 더불어 $L/500$ 크기의 초기 결함을 고려한 비선형좌굴해석을 수행한 결과, 축방향 허용압축응력이 연관된 설계기준에 규정된 값에 비해 높은 것으로 나타났다.
- (4) 실험과 해석에 의한 STKM500 강관의 축방향 허용압축응력은 연관된 모든 설계기준에 규정된 HSB500 강재의 축방향 허용압축응력값에 비해 높은 것으로 나타나므로, 그 상향 한계값을 이용하여 새로운 허용압축응력식을 제안하였다.

연구 결과를 종합해 볼 때, 국부좌굴을 고려하지 않는 STKM500 강관의 허용압축응력값은 새롭게 제안한 식에 의해 산정하는 것이 타당할 것으로 판단되고, 본 연구에 포함되지 않은 국부좌굴을 고려하는 경우에 대해서는 현재 HSB500 강재에 대해 사용되고 있는 도로교설계기준(2010)의 식을 준용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(14CTAP-C077504-01)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] 이종구, 박종원, 배두병(2015) 항만 및 해양구조물용 고강

- 도 내해수강: Poseidon500, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제27권, 제1호, pp.40-43.
- Lee, J.-K., Park, J.-W., and Bae, D.-B. (2015) Seawater Corrosion Resistance Steel, Poseidon500, for Port & Offshore Structures, *Magazine of the Korean Society Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.1, pp.40-43 (in Korean).
- [2] 국가기술표준원(2013) 항만 및 해양 구조용 내식성 강재 (KS D 3003: 2013).
Korean Agency for Technology and Standards (2013) *Corrosion Resistance Steel for Port and Offshore Structures* (KS D 3003: 2013), Korea (in Korean).
- [3] 국가기술표준원(2013) 항만 및 해양 구조용 내식성 강관 (KS D 3300: 2013).
Korean Agency for Technology and Standards (2013) *Corrosion Resistance Steel Tubes for Port and Offshore Structures*, (KS D 3300: 2013), Korea (in Korean).
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials (1986) *AASHTO Highway Structures Design Book, Vol. 1*, AASHTO, USA.
- [5] 이종구(2014) 항만 및 해양 구조물용 고강도 내해수강 (POSEIDON500) 구조설계, 해안와 해양, 한국해양공학회, 제7권, 제2호, pp.67-70.
Lee, J.-K. (2014) Structural Design using High Strength Corrosion Resistance Steel (POSEIDON500) for Port and Offshore Structures, *Coastal and Ocean*, Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol.7, No.2, pp.67-70 (in Korean).
- [6] 조재병(2015) 열연강판 팔각강관 버팀보의 초기편심과 축방향 압축강도, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제1호, pp.23-30.
- Jo, J.B. (2015) Initial Imperfection and Axial Strength of Struts with Octagonal Hollow Section Fabricated from HR Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.1, pp.23-30 (in Korean).
- [7] 해양수산부(2014) 항만 및 어항 설계기준·해설.
Ministry of Oceans and Fisheries (2014) *Design Standards and Commentary for Port and Offshore Structures*, Korea (in Korean).
- [8] 국토해양부(2010) 도로교설계기준.
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Highway Bridge Design Standard*, Korea (in Korean).
- [9] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structure, Part 2: Steel Bridges* (EN 1993-2), Belgium.
- [10] 건설교통부(2003) 허용응력설계법에 의한 강구조설계기준.
Ministry of Construction and Transportation (2003) *Design Specification of Steel Structures by Allowable Stress Design*, Korea (in Korean).
- [11] American Petroleum Institute (2000) *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design* (API RP 2A-WSD, 21st Ed.), USA.
- [12] American Institute of Steel Construction (1989) *Specification for Structural Steel Buildings: Allowable Stress Design and Plastic Design*, AISC, USA.
- [13] Galambos, T.V. (1988) *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures* (5th Ed.), John Wiley & Sons, USA.

요 약 : 해안 및 해양 환경에 노출되어 내부식성이 필수적인 항만 및 해양 구조물용 내식성강 STKM500 강재가 최근 국내의 독자적인 기술로 개발되어 KS D 3300에 신규 등록되었다. 개발된 강재는 일반 구조용 강재에 비해 부식속도가 현저하게 느리고, 지금까지 대표적으로 사용되었던 STK400 및 STK490와 A690 강재보다 경제적이고 고강도여서 미래 수요를 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 STKM500 강재를 이용한 인장실험을 통해 고강도강의 강도를 측정한 후, 2m, 6m, 12m로 제작된 강관에 대한 좌굴실험을 수행하여 허용압축응력을 산정하였다. 특별히 12m 시험체의 경우, 추가 유한요소해석을 수행하여 결과를 보완하였고, STK500 강관에 대한 축방향 허용 압축응력곡선을 제안하였다.

핵심용어 : 축방향 허용압축응력, 고강도 내식성강, STKM500 강관, 좌굴실험, 원형강관