

매개변수해석을 통한 원형 강관의 전단좌굴응력 상세분석

마 호 성¹⁾ · 조 광 일^{2)*}

¹⁾ 교수, 호서대학교, 토목공학과 ²⁾ 책임연구원, 포항산업과학연구원 강구조연구소

Analysis of Shear Buckling Stresses for Steel Pipes by Detailed Parametric Study

Mha, Ho-Seong¹⁾ Cho, Kwang Il^{2)*}

¹⁾ Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Hoseo University, Asan, 330-713, Korea

²⁾ Senior Researcher, Steel Structure Research Division, Research Institute of Industrial Science & Technology, Incheon, 406-840, Korea

ABSTRACT : Shear buckling stresses of steel pipes due to the lateral forces have been analyzed via parametric analysis. Detailed FEM models are prepared, and steel types, thickness, radii and length of steel pipes are selected as parameters. STK400, STK490 and SM570 are used and the thickness of pipe is 2mm and 40mm. The radii(R) and lengths(L) are determined based on the values satisfying the following relationship as $R/t=20\sim 400$ and $L/R=1\sim 3$. The shear buckling stresses decrease for all types of considered steels as R/t increase from 20 to 200. High strength steels are more sensitive to R/t , and also have a bigger effect on shear buckling stresses than low strength steels. It is found that shear buckling stresses decrease as L/R increases, showing that the steel pipes become weak as the length of the steel pipe increases.

KEYWORDS : shear buckling stress, steel pipe, lateral force, FEM, parametric study

1. 서 론

최근 해저자원의 개발이 활발해짐에 따라 다양한 셸 구조의 역학적 연구에 대한 필요성이 높아지고 있다. 셸 구조는 기하학적인 특성에 기인한 강성의 효율적인 이용과 경량화 등에 대한 문제가 중요시 되고 있어 이의 취약점이라 할 수 있는 좌굴에 대한 평가가 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히 해양 구조물에 다양한 형상의 강관이 적용되고 있어 이에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다.

순수전단상태에서 보강재를 갖는 원통형 패널의 탄성 좌굴 거동에 관한 해석 연구는 Batdorf *et al.*^[1], Stein and Yager^[2] 등에 의해 수행되었다. 이들은 원통형 패널에 대한 평형방정식을 유한차분법으로 유도하였으며, 후에 Mariani *et al.*^[3]이 Stein and Yager^[2]의 연구결과를 보강하였다.

Note.-Discussion open until April 30, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 19, 2013; revised September 25, 2013; approved on October 1, 2013. © KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-32-200-2462 Fax. +82-32-200-2479
E-mail: kicho@rist.re.kr

원통 셸의 좌굴에 관해서는 축압축, 외압, 단순휨, 비틀림 등의 초기응력상태가 단순한 경우에 대해 Lorenz(1911)의 연구 이후 많은 연구결과가 제시되어 있다^[3]. 이와 관련하여 Lundquist^[4], Lu^[5], Lee^[6], Shroder^[7], Galletly and Blachut^[8], Yamaki^[9], Choi and Hangai^[10] 등에 의한 연구 성과가 있었다. 이러한 연구들은 상단 수평력을 대상으로 한 전단 및 휨 좌굴에 관한 실험, 고유치해석이 주를 이루고 있으나 상단 수평력으로 인한 파괴현상을 명확히 하고 설계식을 정리하기에는 불충분하다. 특히 이론적 연구에서는 수평하중에 의한 좌굴전의 비축대칭의 변형이 있는 문제에서 초기변형을 무시한 선형고유치 해석에 의한 좌굴하중의 평가는 셸의 형상이 길어질수록 불충분하다^[11]. 또한 좌굴 및 파괴현상은 강관의 형상, 재료, 하중의 작용 위치 등에 의하여 다양한 양상을 보이게 되며 강관의 두께가 비교적 얇고 높이가 낮은 경우에는 전단좌굴응력이 지배하는 탄성전단좌굴 형상이 발생하게 된다.

특히 전단좌굴에 대한 연구가 불충분하여 현행 도로교설계기준^[12]에는 어느 정도 안전 측의 전단좌굴응력 범위를 정하고 있다. 강관의 좌굴에 대한 연구 중 정하중, 원심력, 동하중을 채택한 좌굴 및 파괴성상에 관한 실험적 연구^[13]는 많

으나 횡력에 의한 초기응력의 특성 및 막 응력에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 횡력에 의한 전단응력을 분석하기 위하여 두께가 얇고 짧은 강관구조를 대상으로 전단좌굴거동을 분석하였다.

2. 강관의 전단좌굴

현행 도로교설계기준^[12]의 전단좌굴에 대한 전단응력 τ_t 는 Gerard의 식에서 안전율 3을 적용하고, 길이(L)와 반지름(R)의 비는 길이를 보강재의 최대간격인 바깥지름의 3배로 하여 $R/L = 0.1667$ 을 적용하여 사용 중이다. Gerard의 식을 다음의 식 (1)에 나타내었다.

$$\tau_t = 0.75E\left(\frac{t}{a}\right)^{1.25}\left(\frac{a}{L}\right)^{0.5} \quad (1)$$

- τ_t : 전단응력
- E : 탄성계수
- t : 강관의 두께
- a : 강관의 반지름
- L : 강관의 길이

하지만 Gerard의 식은 1950년대에 저강도 일반강재에 대하여 만들어진 식으로서 현재의 고강도 강재를 적용시킬 경우 어떠한 경향이 나타나는 지 검토할 필요가 있다.

도로교설계기준^[12]에는 탄성범위의 전단좌굴식을 사용하고 있으며, 식 (2)에 나타내었다.

$$\tau = \frac{0.733}{S} \cdot E\left(\frac{t}{R}\right)^{\frac{5}{4}} \cdot \left(\frac{R}{L}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

- τ : 전단응력
- S : 안전율
- E : 탄성계수
- t : 강관의 두께
- R : 강관의 반지름
- L : 강관의 길이

도로교설계기준^[12]에서는 반지름과 관두께의 비(R/t)가 큰 경우의 연구 자료가 부족하므로 어느 정도 안전한 측으로 하였으며, R/L 또한 실용상 충분한 크기로 하였다고 제시되어 있어, 기준이 명확하지 않다. 또한 허용응력을 산정하기 위해 안전율은 R/t 이 작은 범위에서는 1.67~1.77을 사용

하였다고 명시되어있으나 R/t 이 작은 범위에 대한 기준은 명시되어있지 않다. 따라서 본 연구에서는 강관의 거동을 좀 더 명확히 하고 향후 성능중심의 기준을 제시하며 시공 및 설계의 간편화, 시공비 절감 등을 위해 고강도 강재에 대해 매개변수 해석을 통해서 강관의 반지름, 강관의 두께, 강관의 길이 등을 영향을 다양하게 해석하고 그 결과를 분석하고자 한다. 또한 실험적 방법에 의해 고강도 강재의 전단좌굴거동을 분석하기에는 많은 자원이 소요되므로 유한요소해석을 통해 다양한 제원을 가진 강관의 거동을 파악하고자 한다.

3. 해석모형 및 해석방법

좌굴 발생 시 강관의 길이가 반지름에 비하여 길 경우 전단좌굴에 의한 파괴가 아닌 휨 압축응력에 의한 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 순수전단좌굴응력만을 평가하기 위하여 휨 압축이 생기지 않도록 길이와 반지름의 비(L/R)가 3이 하인 짧은 강관을 대상으로 전단좌굴을 유도하고 이에 대한 전단좌굴응력을 평가하기 위하여 기존연구를 참고하여 상단 수평력이 작용하는 경우를 유한요소해석 프로그램을 사용하여 해석하였다^{[14],[15]}. Fig 1은 곡선좌표계와 경계조건을 나타낸 것이며, Fig 2는 ABAQUS에서 모형화를 한 모습이다.

상단 수평력이 작용하는 부분에 수직변위와 회전변위가 발생하면 휨 압축좌굴에 지배되는 파괴가 일어날 수 있기 때문에 순수전단좌굴특성만을 해석하기 위하여 수평에 대한 변위만이 발생하도록 x 축과 z 축의 수평변위와 회전변위는 고정하였다. Rigid Link를 사용하여 강관의 상단 원둘레에 변형이 없도록 변위를 제어하였으며, 완전 고정을 가정하여 유한요소해석을 수행하였다.

비선형좌굴해석을 수행하기 위해서는 탄성좌굴해석이 선행된다. 비선형좌굴해석 시, 탄성좌굴변형을 초기변형으로 적용

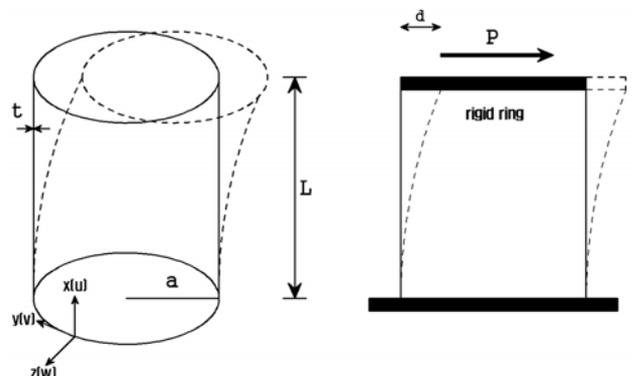


Fig. 1 Coordinate system and boundary conditions of FE model

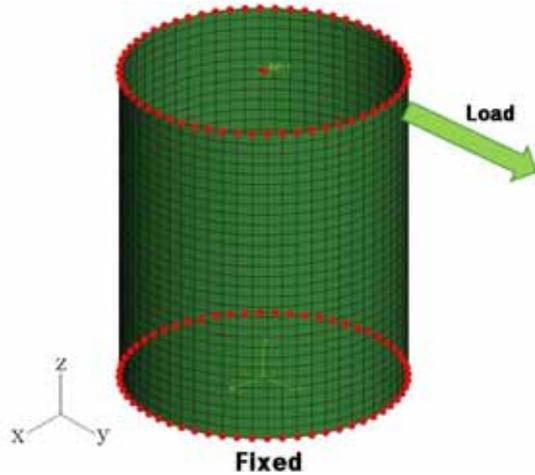


Fig. 2 FE model for steel pipe

하고 비선형좌굴해석이 탄성좌굴변형과 동일한 좌굴 메커니즘으로 유도되도록 하여야 하기 때문이다. 탄성좌굴해석은 선형 탄성 구조물의 이론적 좌굴강도를 예측하는 방법으로서 좌굴 모드를 예측하는 경우에는 비교적 정확하지만 탄성거동만이 고려되기 때문에 실제 좌굴하중보다 크게 평가된다.

본 연구에서는 탄성좌굴해석을 수행한 후 Riks Method^[13]를 사용하여 Post-Buckling해석을 수행하였다. 좌굴해석시의 초기변형은 탄성좌굴해석을 통하여 구해진 1차 좌굴모드 형상에 길이의 1/1000에 해당하는 수치를 초기변형으로 적용하였다. 이는 도로교설계기준^[12]에서 국부좌굴에 대한 축방향의 허용압축응력이 강관의 제작오차를 고려한 좌굴의 식을 기본으로 하여, 관벽의 요철(u)을 $u = 0.001$ 로 하여 강관의 반지름과 관두께의 비(R/t)의 함수로서 구해진 것에 근거한 것이다.

상단 수평력은 변위하중으로 재하하였으며, 사용된 강재는 STK400, STK490, SM570이다. Gerard식은 저강도 강재의 전단좌굴응력을 산정하기에 적합하기 때문에 고강도 강재와의 비교를 위하여 저강도 강재인 STK400을 사용하였으며, STK490강재는 도로교설계기준^[12]에 보강재를 설치하지 않는 경우의 허용전단응력이 명시되어있기 때문에 비교를 위하여 사용하였고, SM570 강재는 저강도와 비교될 고강도 강재로써 적용하였다. 해석에 사용된 강관은 Table 1에 나타내었다.

강관 두께는 도로교설계기준^[12]에서 허용전단응력 강관의 판 두께에 대하여 명시되어있는 기준을 사용하여 40mm이하는 2mm, 40mm초과 100mm이하와 40mm초과 75mm이하에서는 40mm를 사용하였다. 이는 두께가 반지름이나 길이에 비해 얇도록 설정하여 순수전단좌굴을 유도하기 위함이다. SM 570의 경우 도로교설계기준^[12]에 STK400과 STK490에는 없는 75mm초과 100mm이하일 경우에 대한 기준이

Table 1. Analysis case

Steel grade	Thickness	R/t	L/R
STK400	2mm	20~200 (20 Distance)	1~3
	40mm		
STK490	2mm		
	40mm		
SM570	2mm		
	40mm		

Table 2. Strength of the steel

Grade	Thickness (mm)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
STK400	$t \leq 40$	240	400
	$40 < t \leq 100$	220	
STK490	$t \leq 40$	320	490
	$40 < t \leq 100$	300	
SM570	$t \leq 40$	460	570
	$40 < t \leq 75$	440	

있지만 비교 대상이 없기 때문에 해석사례에서는 제외 시켰다.

반지름의 경우는 두께와 마찬가지로 도로교설계기준^[12]에 명시되어있는 R/t 의 범위에 포함될 수 있도록 R/t 이 20보다 크고 200보다 작은 범위 내에서의 반지름을 선택하였고 길이는 L/R 이 1, 2, 3이 되도록 하였다. 해석에 사용된 강재의 강도는 Table 2에 나타내었다.

도로교설계기준^[12]에서 STK400은 SM400에, STK490은 SM490에 준하는 응력 값을 사용하도록 명시되어있다. 따라서 해석에 사용된 강재의 항복강도 및 인장강도는 도로교설계기준^[12]에 제시된 SM400, SM490, SM570의 강도를 사용하였다. 좌굴응력은 두께와 반지름의 비에 따라 강관을 종류별로 나누어 해석을 실시하고, 전단좌굴이 발생했을 때 해석에 의한 직접 전단응력 결과를 산출하여 비교 분석하였다.

4. 다양한 매개변수에 따른 강관의 좌굴 거동 분석

강관에 작용하는 전단좌굴응력은 높이에 따라서 달라지기 때문에 최대전단좌굴응력이 발생하는 위치를 알아보기 위하여 Fig 3(b)에서 나타낸 바와 같이 동일한 높이에 있는 요소의 전단좌굴응력에 대한 평균값을 비교하였다. 그 결과 강관의 중앙지점에서 전단좌굴응력의 평균값이 가장 크게 나타났다(Fig 3(a)). 따라서 이후의 분석에서는 강관 중앙지점에 나타나는 전단좌굴응력의 평균값을 비교하였다.

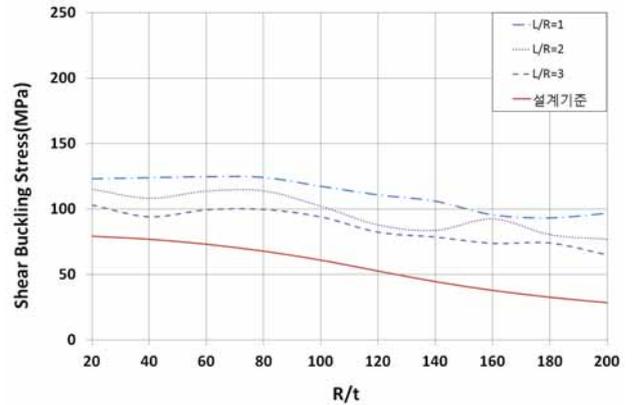
4.1 강종별 길이변화에 따른 전단좌굴응력 분석

우선 동일한 강종에서 강관의 길이가 전단좌굴응력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 길이와 반지름의 비(L/R)에 대한 변화에 따른 전단좌굴응력을 비교 분석하였다.

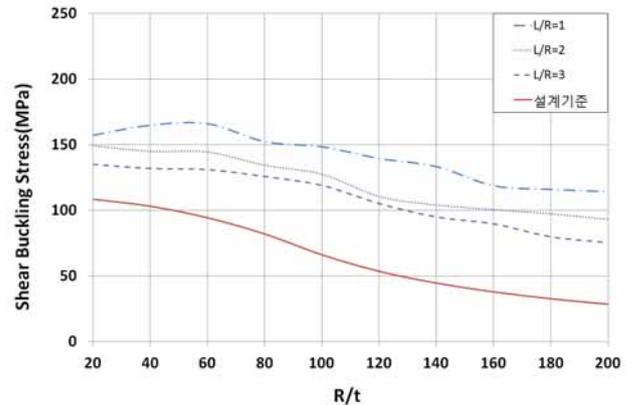
Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 두께가 2mm인 강관에 대한 전단좌굴응력은 각 강종별로 비교한 결과, STK400의 경우 $L/R=1$ 일 때 도로교설계기준^[12]에 명시된 허용전단응력에 비하여 1.6배~3.4배 정도 크게 나타났으며, $L/R=2$ 일 때는 1.4배~2.7배, $L/R=3$ 일 때는 1.2배~2.3배 크게 나타났다. STK490의 경우에는 $L/R=1$ 일 때 1.5배~4.0배, $L/R=2$ 일 때 1.4배~3.3배, $L/R=3$ 일 때 1.2배~2.6배, SM570의 경우에는 $L/R=1$ 일 때 1.5배~5.2배, $L/R=2$ 일 때 1.5배~3.9배, $L/R=3$ 일 때 1.2배~3.0배 크게 나타났다. 또한, 모든 강종에 L/R 의 커질수록 즉, 길이가 길어질수록 전단좌굴응력이 점점 작아지는 결과가 나타났다.

한편, R/t 이 20에서 200으로 증가할 때 전단좌굴응력이 감소하는 경향을 보였으며, 해석에 의한 전단좌굴응력과 도로

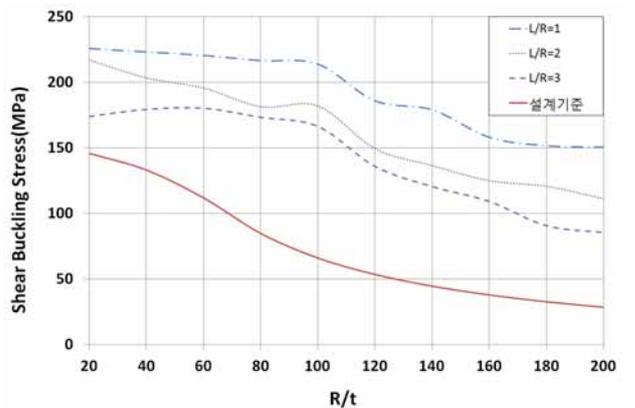
교설계기준^[12]에 의한 전단좌굴응력의 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, $L/R=1$ 일 때 $R/t=20$ 에서 도로교설계기준^[12]에 의한 전단좌굴응력과 약 1.5배의 차이를 보인다 반면, $L/R=3$ 일 때 $R/t=20$ 에서는 약 1.2배 정도 차이를 보이는 것으로 미루어 볼 때 L/R 이 증가할수록 도로교설계기준^[12]에 의한 전단좌굴응력과의 차이가 감소할 것으로 예상된다.



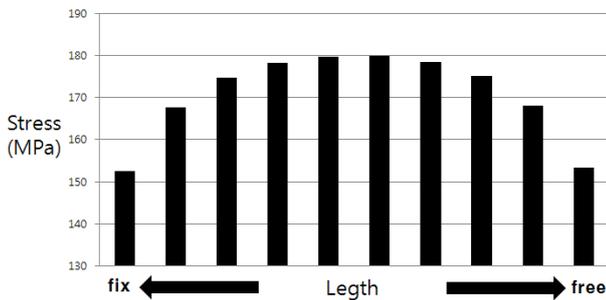
(a) STK400



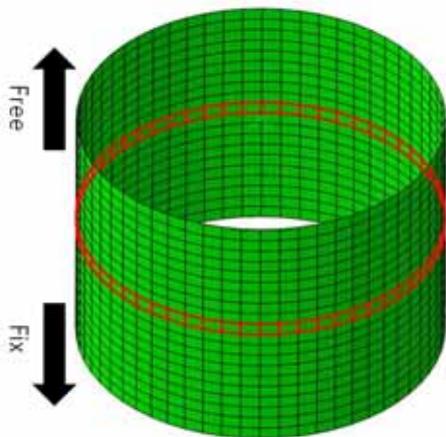
(b) STK490



(c) SM570



(a) Average shear stress along the height



(b) Measurement location

Fig. 3 Measurement location of maximum shear buckling stress

Fig. 4 Shear buckling stresses of pipes with wall thickness of 2mm

Fig 5는 두께가 40mm일 때 전단좌굴응력 결과를 비교한 것이다. 도로교설계기준^[12]에 의한 허용전단응력과 비교하였을 때 STK400은 $L/R=1$ 일 때 1.5배~3.0배, $L/R=2$ 일 때 1.4배~2.8배, $L/R=3$ 일 때 1.2배~2.2배 큰 것으로 나타났으며, STK490은 각각 순서대로 1.5배~3.8배, 1.4배~3.8배, 1.2배~3.0배 크게 나타났고, SM570은 1.6배~5.2배, 1.5배~3.8배, 1.2배~3.1배 크게 나타났다. 또한 두께가 2mm인 강관과 마찬가지로 길이가 길어질수록 강

관의 전단좌굴강도는 작아졌으며, R/t 이 커질수록 그 차이는 커졌다.

도로교설계기준^[12]에 의한 전단좌굴응력과의 비교 결과를 보면 알 수 있듯이, 두께가 2mm인 강관과 40mm인 강관의 전단좌굴응력차이는 크게 나지 않는 것으로 보아 두께가 전단좌굴에 미치는 영향은 크지 않으며, 오히려 두께와 반지름의 비율이 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 모든 강종에서 R/t 과 L/R 이 증가할수록 전단좌굴응력은 작아졌으나 감소율이 균일하지 않았다. 이는 강관의 초기 변형에 따른 비선형 거동에 의해 국부좌굴이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

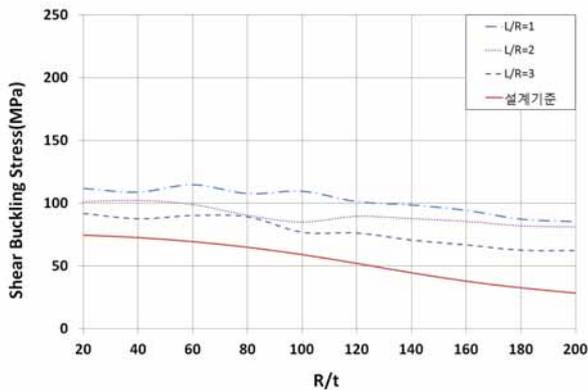
도로교설계기준^[12]에서 강관부재의 보강재에 대한 기준은 최대간격을 바깥지름의 3배, 즉 $L/R=6$ 이상인 경우 보강재를 설치하도록 제시되어 있다. 길이에 따른 전단좌굴강도의 감소경향으로 보아 $L/R=6$ 인 경우에 전단좌굴강도가 설계기준보다 안전측이 아닐 수 있다. 그러나 L/R 이 증가할 경우 강관에 작용하는 수평력에 의한 휨 모멘트가 강관의 좌굴거동을 지배하게 되므로 도로교설계기준에 제시된 강관의 보강재 최대 간격을 고려한 좌굴거동 분석을 위해서는 향후 전단과 휨의 복합적 좌굴거동에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

향후 추가연구를 통한 면밀한 검토가 필요할 것으로 보인다. 또한, 두께 40mm도 두께 2mm와 동일하게 R/t 이 증가함에 따라 전단좌굴응력이 감소하는 경향을 보였으며, 도로교설계기준^[12]에 의한 허용전단응력과 차이도 증가하는 것으로 나타났다. R/t 의 변화가 전단좌굴응력에 미치는 영향을 좀 더 면밀히 분석하기 위해서는 향후 두께와 반지름에 대하여 좀 더 다양한 매개변수 해석을 실시하여야 한다고 판단된다.

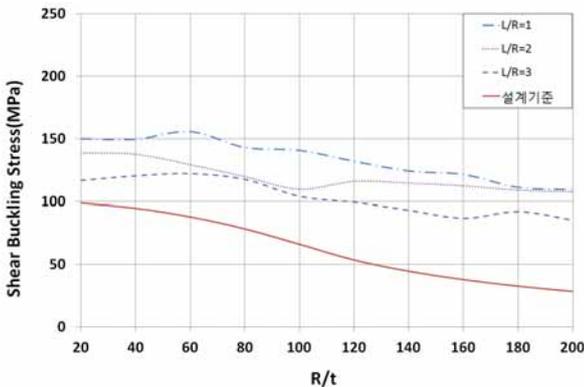
4.2 강도와 반지름에 따른 전단좌굴응력 분석

강관의 길이와 두께가 동일할 때 강관 강도가 전단좌굴응력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 강종의 변화에 따른 전단좌굴응력을 비교분석하였다. 이하의 결과는 앞 절의 결과를 재정리 한 것이므로 $L/R=2$ 인 경우에 대해서만 Fig 6에 나타내었다.

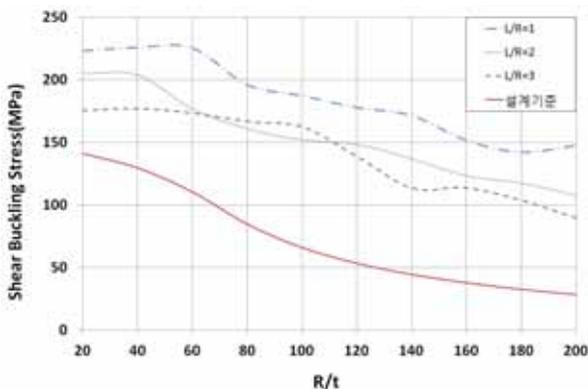
두께가 2mm이며 $R/t=20$ 일 때는 STK400보다 STK490이 1.3배 더 큰 값을 나타냈다. 이는 STK490의 항복응력이 STK400의 항복응력보다 1.3배 큰 것과 유사한 결과임을 알 수 있다. STK490과 SM570의 경우에도 SM570의 전단좌굴응력이 1.4배 더 크게 나타났으며, 항복응력 또한 1.4배 더 크게 나타나 전단좌굴응력의 최대차이 값과 유사한 결과



(a) STK400



(b) STK490



(c) SM570

Fig. 5 Shear buckling stresses of pipes with wall thickness of 40mm

를 나타냈다. $R/t = 200$ 일 때는 STK400보다 STK490이 1.2배 더 큰 값을 나타냈으며, STK490과 SM570의 경우에는 SM570이 1.2배 더 큰 값을 나타내어 두 경우 모두 항복 응력의 차이보다 작은 차이를 보였다. 두께 40mm의 경우에도 $R/t = 20$ 일 때 STK490의 전단좌굴응력이 STK400보다 1.4배 크고, 항복응력 또한 STK490이 STK400에 비하여 1.4배 큰 값을 보였으며, SM570 또한 STK490에 비하여 전단좌굴응력이 1.5배, 항복응력이 1.5배 더 큰 값을 갖는 유사한 결과를 나타냈다. $R/t = 200$ 일 때는 STK400보다 STK490이 1.3배 더 큰 값을 나타냈으며, STK490과 SM570의 경우에는 동일한 값을 나타내었다. 이러한 경향은 모든 해석 사례에서 나타났으며, 이런 결과로 미루어 볼 때 R/t 이 증가할수록 재료의 강도가 전단좌굴응력에 미치는 영향은 감소하는 것을 알 수 있다.

R/t 의 변화에 따른 STK400의 전단좌굴응력은 $L/R = 2$ 이고 두께 2mm인 경우, $R/t = 20$ 일 때 보다 $R/t = 200$ 일 때가 33%감소하였다. STK490은 $R/t = 20$ 일 때 보다 $R/t = 200$ 일 때가 38%감소하였고, SM570은 49%감소하였다. 두께가 40mm일 때는 STK400에서 $R/t = 20$ 일 때 보다 $R/t = 200$ 일 때가 20%감소하였고, STK490은 22%,

SM570은 48% 감소하였다. R/t 의 변화에 따른 전단좌굴응력은 저강도 강재일수록 감소하는 경향이 약하고 고강도 강재일수록 감소하는 경향이 강하게 나타나는 것으로 보아 고강도 강재일수록 R/t 의 변화에 민감하며, 전단좌굴응력에 미치는 영향도 커지는 것으로 판단된다. 또한 두께의 변화에 따른 전단좌굴응력은 $L/R = 2$ 일 때 STK400은 33%에서 20%, STK490은 33%에서 20%로 확연하게 줄었으나, SM570의 경우는 48%에서 47%로 차이가 거의 없었다.

5. 결론

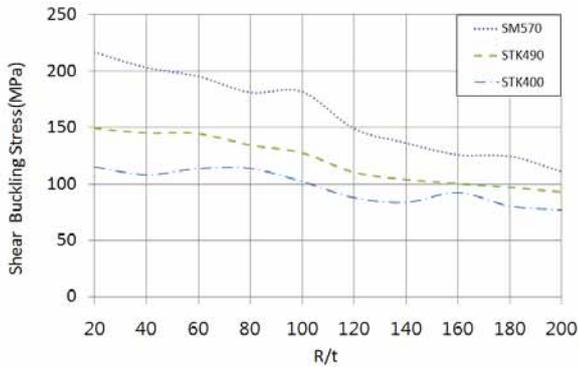
본 연구에서는 강관에 작용하는 전단좌굴응력을 분석하고 다양한 매개변수를 이용하여 강관의 전단좌굴 거동을 분석하였다. 강종, 두께, 길이, 반지름 등의 변화에 따른 강관의 전단좌굴응력에 대한 매개변수 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 모든 강종에서 반지름과 관두께의 비(R/t)와 길이와 반지름의 비(L/R)가 증가할수록 전단좌굴응력은 작아졌다. 그러나 감소율이 균일하지 않았으며, 이는 강관에 국부좌굴이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) 강관의 길이가 길어질수록 전단좌굴에 취약하게 나타났으며, 향후 도로교설계기준에 제시된 강관 보강재의 최대간격($L/R = 6$)을 고려한 추가 연구를 통해 합리적인 기준 제시가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) $R/t = 20$ 에서 $R/t = 200$ 로 변화할 때 전단좌굴응력은 STK400의 경우 21%~36%, STK490은 22%~44%, SM570은 34%~51% 감소하였다. 따라서 고강도 강재일수록 R/t 의 변화에 민감하며, 전단좌굴응력에 미치는 영향도 커지는 것으로 판단된다.

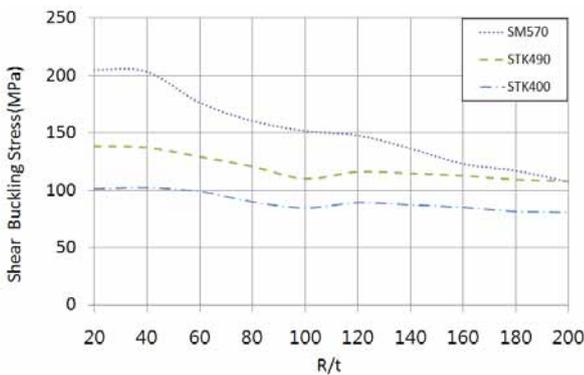
본 연구는 휨 압축파괴가 생기지 않고 순수전단좌굴을 유도하기 위하여 비교적 길이가 짧고 두께가 얇은 강관에 대하여 유한요소해석을 실시하였다. 향후에는 길이가 긴 강관과 두께, 반지름에 대한 더욱 많은 매개변수 해석을 통하여 전단좌굴응력의 변화와 강관의 거동, 보강재, 조합응력으로 인한 파괴 등에 대한 연구가 계속 되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(313-2008-2-D01094)이며, 이에 감사드립니다.



(a) $L/R = 2, t = 2mm$



(b) $L/R = 2, t = 40mm$

Fig. 6 Shear buckling stresses of pipes with various steel grades

참고문헌(References)

- [1] Batdorf, S.B., Stein, M., and Schildcrout, M. (1947) Critical Shear Stress of Curved Rectangular plates, *NACA TN No.1342*, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D.C.
- [2] Stein, M. and Yeager, D.J. (1949) Critical Shear Stress of Curved Rectangular Panel with a Central Stiffener, *NACA TN No.1972*, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D.C.
- [3] Mariani, N., Mozer, J.D., Dyme, C.L., and Culver, C.G. (1973) Transverse Stiffener Requirements for Curved Webs, *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 99, No. 4, pp.757-771.
- [4] Lundquist, E.E. (1935) Strength Tests of Thin-Walled Duralumin Cylinders in Combined Transverse Shear and Bending, *NACA Technical Note*, No. 523.
- [5] Lu, S.Y. (1965) Buckling of Cantilever Cylindrical Shell with a Transverse End Load, *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 12, pp.2305-2351.
- [6] Lee, R.-L. (1969) Buckling of Stiffened Cylindrical Shell with Transverse Shear Load, *AIAA Journal*, Vol. 7, No. 4, pp.1095-1097.
- [7] Schröder, P. (1974) The Buckling Behaviour of Transverse Loaded Circular Cylinders, *Technical Translation ESRO TT-105*.
- [8] Galletly, G.D. and Blachut, J. (1983) Buckling of a Cantilevered Cylindrical Shell Subjected to a Transverse Shearing Force at Its Tip, *Proceedings of the Third International Colloquium on Stability of Metal Structures*, Paris, pp.16-17.
- [9] Yamaki, N. (1984) Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells, *North-Holland*, pp.453-476.
- [10] Choi, H.-S. and Hangai Y. (1984) Local Buckling of Cylindrical Tanks under the Horizontal Load, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, No. 17, pp.3-11.
- [11] 최현식(1995) 강제변위에 의한 탑상형 원통셸의 응력해석에 관한 연구, *대한건축학회 논문집*, 대한건축학회, 제 11권, 제9호, pp.175-182.
- Choi, H.-S. (1995) A Study on Stress Analysis of Cantilevered Cylindrical Shells under Prescribed Displacement, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 11, No. 9, pp.175-182.
- [12] 국토해양부, *도로교설계기준* (2010). Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Design Code of Road-Bridge*.
- [13] ABAQUS User's Manual 6.4, Hibit, Karlson and Sorenson.
- [14] 마호성, 조광일(2012) 강관과일의 전단좌굴응력에 관한 매개변수 연구, *한국방재학회 논문집*, 한국방재학회, 제12권, 제5호, pp.41-46.
- Mha, H.S. and Cho, K.I. (2012) A Parametric Study on Shear Buckling Stresses of Steel Pile, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 5, pp.41-46.
- [15] Athiannan, K. and Palaninathan, R. (2004) Buckling of Cylindrical Shells under Transverse Thear, *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, No. 9, pp.1307-1328.

요약 : 본 연구에서는 매개변수해석을 통하여 횡력에 의한 강관의 전단좌굴응력에 대해 분석을 하였다. 비선형좌굴에 의한 전단좌굴 응력을 산정하기 위해 ABAQUS의 상세 셸 모델을 적용한 유한요소해석을 수행하였으며, 매개변수로는 강종, 두께, 반지름 그리고 길이를 선택하였다. 해석대상 강종은 STK400, STK490, SM570이며, 강재의 두께는 2mm, 40mm로 하였고 반지름과 부께의 비(R/t)는 20~200, 길이와 반지름의 비(L/R)는 1~3이 되도록 하였다. 모든 강종에서 R/t 이 20에서 200으로 변화하였을 때 전단좌굴응력은 감소하였고, 저강도 강재보다 고강도 강재일수록 R/t 의 변화에 민감하며, 전단좌굴응력에 미치는 영향도 커지는 것으로 나타났다. 또한 L/R 이 증가할수록 전단좌굴강도가 작아지는 것으로 보아 강관의 길이가 길수록 전단좌굴에 취약하다는 것을 알 수 있다.

핵심 용어 : 전단좌굴응력, 강관, 횡력, 유한요소해석, 매개변수해석