강관파일의 전단좌굴응력에 관한 매개변수 연구

A Parametric Study on Shear Buckling Stresses of Steel Pile

마호성* · 조광일**

Mha, Ho Seong · Cho, Kwang Il

Abstract

Parametric analysis has been thoroughly conducted to see the shear buckling stresses of steel piles made of STK400, STK490 and SM570 by using detailed FEM model via commercial code ABAQUS. The thickness of pipe is 2 mm, 40 mm and 75 mm, and radii and lengths are determined based on the values satisfying the following relationship as $R/t=20\sim400$, $L/R=1\sim3$. Nonlinear buckling behaviors are simulated by giving the initial imperfection with the value of 1/1000 in the longitudinal direction according to the first buckling mode obtained from the elastic buckling analysis. P_{cr} is prepared to calculate the shear buckling stresses based on the beam theory, and P_{cr} decreases as L/R increases. The shear buckling stresses is found to decrease as R/t and L/R increases for all steel types considered. The rate of decrease is rather high for the high strength steels. It should be noticed that the decrease rate is sensitive to the length of pile.

Key words : Shear Buckling, Steel Pile, FEM, Parametric Study

요 지

본 연구에서는 강관파일의 전단좌굴응력을 알아보기 위하여 ABAQUS를 사용한 상세 유한요소모델을 통하여 매개변수 해석을 실시하였다. 해석에 사용한 강종은 STK400, STK490, SM570이며, 강재의 두께는 두께의 경우 2 mm, 40 mm, 75 mm로 하였고, 반지름은 $R/t=20\sim400$, 길이는 $L/R=1\sim3$ 의 범위 안에 포함이 되도록 정하였다. 좌굴 해석은 탄성좌굴해석으로부터 얻은 1차 좌굴모드를 이용하여 길이방향의 1/1000에 해당하는 수치를 초기변형으로 주어 비선형좌굴해석을 수행하였다. 보 이론에 해당하는 식을 이용하여 전단좌굴응력을 구하기 위해 전단좌굴하중(P_{cr})을 구하였고, P_{cr} 은 L/R 이 커질수록 작아지는 결과가 나타났다. 전단좌굴응력은 모든 강종에서 R/t 와 L/R 이 증가할수록 작아지는 경향이 나타났으며, 고강도 강재일수록 감소율이 커지는 것을 알 수 있었다. 특히 고강도 강재에서는 전단좌굴응력길이의 증가에 대해 민감한 것으로 밝혀졌다.

핵심용어 : 전단좌굴, 강관파일, 유한요소해석, 매개변수해석

1. 서 론

강곡선 부재의 거동을 밝히기 위한 해석 및 실험연구는 1970년대 이후로 다양하게 수행되어 왔으나, 대부분의 연구가 휨과 비틀림 거동에 초점이 맞춰져 있었으며, 상대적으로 전단거동에 관한 연구는 관심이 많지 않았다. 순수전단상태에서 보강재를 갖는 원통형 패널의 탄성 좌굴거동에 관한 해석 연구는 Batdorf(1947), Stein and Yager(1949)등에 의해 수행되었다. 이들은 원통형 패널에 대한 평형방정식을 유한차분법으로 유도하였으며, 후에 Mariani et al.(1973)이 Stein and Yager(1949)의 연구결과를 보강하였다. 원통 쉘의 좌굴에 관해서는 축압축, 외압, 단순휨, 비틀림 등의 초기응력상태가 단순한 경우에 대해서는 1911년 Lorenz의 연구이후 많은 연구결과가 제시되어 있다. 이와 관련하여 1935년

Lundquist 이후, Yamaki, Shroder, Galletly, Lu, Lee, Hangai, Uchiyama등의 연구자들에 의한 연구 성과가 있었다. 이러한 연구들은 상단 수평력을 대상으로 한 전단 및 휨 좌굴에 관한 실험, 고유치해석이 주를 이루며 이 부분의 파괴현상을 명확히 하여 설계기준식을 정리하기에는 불충분하였다. 특히 이론적 연구에서는 수평하중에 의한 좌굴전의 비축대칭의 변형이 있는 문제에서 초기변형을 무시한 선형고유치 해석에 의한 좌굴하중의 평가는 쉘의 형상이 길어질수록 불충분하다고 판단된다. 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.

현행 도로교설계기준(대한토목학회, 2008)에는 전단좌굴에 대한 설계기준이 미흡한 부분이 있으며 충분한 연구 결과가

*정회원 · 호서대학교 토목공학과 교수(E-mail : mhah@hoseo.edu)

**정회원 · 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원(교신저자)

없어서 보수적으로 안전 측의 범위를 정하고 있다. 실제 좌굴에 대한 연구는 정하중, 원심력, 동하중을 채택한 좌굴 및 파괴성상에 관한 실험적 연구는 많으나 횡력에 의한 초기응력의 특성 및 막응력에 대한 보 이론의 적용 타당성, 비축대칭하중 등의 좌굴에 대해서는 아직 연구결과가 충분치 않다. 따라서 본 연구에서는 해석결과를 신뢰할 수 있는 범용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 고강도 원형 강관 구조물의 전단좌굴특성을 비선형좌굴해석을 통하여 분석하였다.

2. 강관의 전단좌굴

현행 도로교설계기준(대한토목학회, 2008)의 전단좌굴에 대한 응력평가는 Gerard식에서 안전율 3을 적용하고, 길이와 반지름의 비는 길이를 보강재의 최대간격인 바깥지름의 3배로 하여 $R/L=0.1667$ 을 적용하여 사용 중이다.

Gerard의 식을 다음의 식 (1)에 나타내었다.

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

하지만 Gerard식은 1950년대에 저장도 일반강재에 대하여 만들어진 식이기 때문에 현재의 고강도 강재에 적용시키기에 적합한지의 여부는 아직 불분명하다고 할 수 있다.

특히, 현재의 도로교설계기준(대한토목학회, 2008)에는 탄성 범위의 전단좌굴식을 사용하여 충분히 보수적인 안전율을 채택하므로 과다설계로 이어질 수 있기 때문에 시공 및 설계의 간편화, 시공비 절감 등을 위해 고강도 강재에 대해 매개변수 해석을 통해서 강관의 반지름, 강관의 두께, 강관의 길이 등을 다양하게 해석하고 그 결과를 분석하기로 한다. 또한 고강도 강재의 전단좌굴에 대한 실험에는 한계가 있기 때문에 유한요소해석 프로그램을 통한 해석방법을 제시한다.

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 3이하인 짧은 강관을 대상으로 전단좌굴을 유도하고 이에 대한 전단좌굴응력을 평가하기 위하여 기존연구를 참고하여 상단 수평력이 작용하는 경우를 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석하였다. 그림 1은 곡선좌표계와 경계조건을 나타낸 것이다.

그림 2는 ABAQUS에서 모형을 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 Ring를 사용하여 강관의 상단 원둘레에 변형이 없도록 변위를 제어하였으며, 완전 고정을 가정하여 유한요소 해석을 수행하였다.

그림 1. 곡선좌표계 및 경계조건

그림 2. ABAQUS 모형화

비선형좌굴해석을 수행하기 위해서는 탄성좌굴해석이 선행된다. 비선형좌굴해석 시, 탄성좌굴변형을 초기변형으로 적용하고 비선형좌굴해석이 탄성좌굴변형과 동일한 좌굴 메커니즘으로 유도되도록 하여야 하기 때문이다. 탄성좌굴해석은 선형 탄성 구조물의 이론적 좌굴강도를 예측하는 방법으로 좌굴 모드를 예측하는 경우는 비교적 정확하지만 탄성거동만이 고려되기 때문에 실제 좌굴하중보다 크게 평가된다.

본 연구에서는 탄성좌굴해석을 수행한 후 Riks Method (ABAQUS User's Manual 6.4)를 사용하여 Post-Buckling 해석을 수행하였다. 좌굴해석시의 초기변형은 탄성좌굴해석을 통하여 구해진 1차 좌굴모드 형상에 길이의 1/1000에 해당하는 수치를 초기변형으로 적용하였다. 초기변형을 길이의 1/1000로 한 이유는 도로교설계기준에서 국부좌굴에 대한 측방형의 허용압축응력이 강관의 제작오차를 고려한 좌굴의 식을 기본으로 하여, 관벽의 요철을 $\nu=0.001$ 로 하여 강관의 반지름과 관두께의 비(R/t)의 함수로서 구해진 것에 근거한 것이다.

상단 수평력은 변위하중으로 재하하였고, 강관의 두께는 순수전단좌굴을 유도하기 위하여 도로교설계기준에 명시되어있는 기준에서 가장 얇은 2mm로 하였으며, 강관의 길이는 반지름과의 비가 1이 되도록 하였다. 사용된 강재는 STK400, STK490, SM570이다. Gerard식은 저장도 강재의 전단좌굴응력을 산정하기에 적합하기 때문에 고강도 강재와의 비교를 위하여 저장도 강재인 STK400을 사용하였으며, STK490강재는 도로교설계기준에 보강재를 설치하지 않는 경우의 허용전

단응력이 명시되어있기 때문에 비교를 위하여 사용하였고, SM570 강재는 저강도와 비교될 고강도 강재로써 현재 도로 교설계기준에 명시되어있기에 사용하였다.

해석에 사용된 강관은 표 1에 나타내었다.

표. 1 해석사례

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

강관의 제원은 두께의 경우 도로교설계기준(대한토목학회, 2008)에서 허용전단응력 강관의 판 두께에 대하여 명시되어 있는 기준을 사용하여 40 mm이하는 2 mm, 40 mm초과 100 mm이하와 40초과 75 mm이하에서는 40 mm, 75 mm초과 100 mm이하에서는 75 mm를 사용하였다. 이는 두께가 반지름이나 길이에 비해 얇도록 설정하여 순수전단좌굴을 유도 하기 위함이다. 반지름의 경우는 두께와 마찬가지로 도로교설 계기준(대한토목학회, 2008)에 명시되어있는 R/t의 범위에 포 함될 수 있도록 R/t이 20보다 크고 200보다 작은 범위 내에 서의 반지름을 선택하였고 길이는 L/R이 1, 2, 3이 되도록 하였다.

해석에 사용된 강재의 강도는 표 2에 나타내었다.

표 2. 강재의 강도

강종	STK400		STK490		SM570		
판 두께 (mm)	40 이하	40 초과 100 이하	40 이하	40 초과 100 이하	40 이하	40 초과 75 이하	75 초과 100 이하
기준 항복점 (MPa)	240	220	320	300	460	440	430
인장 강도 (MPa)	400~520		490~620		570~730		

도로교설계기준(대한토목학회, 2008)에서 STK400은 SM400 에, STK490은 SM490에 준하는 응력 값을 사용하도록 명시 되어있다. 따라서 해석에 사용된 강재의 항복강도 및 인장강 도는 도로교설계기준(대한토목학회, 2008)에 있는 SM400, SM490, SM570의 강도를 사용하였다.

좌굴응력은 비탄성좌굴해석을 시행한 후 결과 값인 하중-변 위곡선에서 좌굴점에 대한 하중인 P_{cr} 을 구하고 이에 대한 전단좌굴응력을 보 이론의 식으로 구하며, 강관 해석 시에는 두께와 반지름의 비에 따라 강관을 종류별로 나누어 해석을 실시하였다.

4. 매개변수를 고려한 강관의 좌굴 거동 결과

본 절에서는 강관의 강종 및 두께, 길이 등에 따른 전단좌 굴응력의 변화를 알아보기 위해 보 이론의 식에 의한 전단좌 굴하중(P_{cr})을 적용하여 전단좌굴응력을 구하였다.

P_{cr} 에 대한 전단좌굴응력을 계산하기 위해 보 이론에 해당 하는 식을 이용하며, 식은 다음과 같다.

$$\tau_{cr} = \frac{P_{cr}}{\pi R T} \quad (2)$$

P_{cr} 은 프로그램 해석결과인 하중-변위 곡선에서 극한하중으 로 하였다. 두께 2 mm, L/R=1인 STK400강재의 P_{cr} 의 산정 방법을 그림 3에 나타내었다.

그림 3. P_{cr} 산정의 예

위의 산정방법으로 강종별 P_{cr} 을 구하여 그림 4에 나타내었 다. 두께 2 mm와 40 mm에 대한 그래프의 경향이 유사하기 때문에 강종별로 두께 40 mm일 때만 대표적으로 나타내었다.

P_{cr} 은 모든 강종에서 L/R이 커질수록 작아지는 결과를 나타 내었다. R/t이 동일하고 L/R이 1에서 2로 변화할 때 P_{cr} 의 최대 감소율이 STK400($t=40$ mm)에서는 약 29%였고, STK490 ($t=40$ mm)은 약 28%, SM570($t=40$ mm)은 약 26%로 나타 났다. 또한 모든 강종에서 대략 20~30%정도의 감소율을 보 였으나, 소수 몇몇의 결과에서 이 범위를 벗어나는 결과가 나타나는 것을 알 수 있었는데, 이는 초기변형 및 프로그램 의 해석상 오차에 의한 것이라고 판단된다.

P_{cr} 을 이용하여 보 이론에 해당하는 식으로 구한 전단응력 을 분석하기 위하여 두께 2 mm일 때 R/t과 L/R의 변화에 따른 강종별 결과를 그림 5에 나타내었다.

그림 5를 보면 알 수 있듯이 모든 강종에서 L/R이 증가할 수록 전단응력강도는 작아지는 경향을 보였으나 감소하는 비 율이 R/t의 변화에 따라 균일하지 못하고 편차가 심하다는 것을 알 수 있다. 특히 강도가 높은 강재일수록 그 차이가 더 크게 나타났으며, 이는 R/t의 변화에 따른 전단응력에서도 나타났다. 즉, STK400의 경우 R/t이 20일 때 보다 200일 때 약 40%의 감소한 반면, SM570은 52%가 감소하여 결과 적으로 R/t이 증가할수록 전단좌굴응력이 작아지는 결과가 나 타났으나, 이 결과 역시 균등하게 감소하는 경향을 보이지는 않았다. 이는 두께가 얇을 경우 국부적으로 좌굴이 발생하기

(a) STK400의 $P_{cr}(t=40mm)$

(b) STK490의 $P_{cr}(t=40mm)$

(c) SM570의 $P_{cr}(t=40mm)$

그림 4. 강종별 P_{cr}

때문인 것으로 판단된다. 이와 비교를 위해 그림 6에는 두께 40 mm로 증가시킨 L/R 의 변화에 따른 강종별 전단응력을 나타내었다.

두께가 40 mm일 때 전단응력의 변화는 두께 2 mm보다는 균등하게 나타나는 것을 그림 6을 통하여 알 수 있다. L/R 이 1에서 2로 증가했을 때 STK400은 약 17~29%의 감소율이 나타났으며, STK 490은 약 17~27%, SM570은 약 16~26%정도로 나타났다. L/R 이 2에서 3으로 증가할 때는 좀 더 큰 감소율을 보였는데 이는 길이가 길수록 전단응력에 취약해지기 때문이라고 판단된다.

(a) STK400

(b) STK490

(c) SM570

그림 5. L/R 의 변화에 따른 전단응력($t=2mm$)

그림 6에 나타난 바와 같이, 두께가 40 mm이고 $L/R=1$ 일 때 R/t 의 변화에 따른 전단응력을 살펴보면, R/t 이 20일 경우보다 200일 때 STK400의 경우 약 35%의 감소율을 나타내었으며, STK490은 약 31%, SM570은 약 30%로서 두께가 2 mm일 때와는 달리 고강도 강재인 SM570이 가장 작은 감소율을 보였다. 반면 SM570에서 $L/R=3$ 인 경우에는 53%정도의 큰 감소율을 보였다. 이 결과는 향후 강도와 두께 및 길이의 관계 등에 관하여 더욱 연구가 필요하다고 판단된다.

그림 7에는 두께 40 mm일 때 동일한 R/t 와 L/R 의 경우 강종의 변화에 따른 전단응력을 나타내었다. 두께 2 mm보다 좀 더 균등한 결과가 나타나는 두께 40 mm의 결과로 전단응력을 분석하였다.

강종의 차이에 의한 전단응력은 $L/R=1$ 일 때 STK400이

(a) STK400

(b) STK490

(c) SM570

그림 6. L/R 의 변화에 따른 전단응력($t = 40 \text{ mm}$)

SM570보다 최대 248 MPa, 최소 177 MPa까지 나타났으며, $L/R=3$ 일 때는 최대 169 MPa, 최소 52 MPa의 작게 나타났다. 이를 통해 이 커질수록 강종별 전단좌굴응력의 차이가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 또한 두께 2 mm일 때도 위와 비슷한 경향을 보였다.

$L/R=3$ 일 때 SM570의 경우 다른 강종에 비하여 R/t 의 증가에 따른 전단좌굴응력 감소율이 큰 것으로 나타났다. 앞선 L/R 의 변화에 따른 STK400과 SM570의 전단좌굴응력 차이와 $L/R=3$ 의 경우 R/t 의 증가에 따른 SM570의 전단좌굴응력 감소율에 대한 결과로 미루어 보아 고강도 강재일수록 저강도 강재에 비하여 길이의 변화에 보다 민감하다고 판단된다.

강관파일의 전단좌굴응력에 관한 매개변수 연구

(a) $t = 40 \text{ mm}$, $L/R = 1$

(b) $t = 40 \text{ mm}$, $L/R = 2$

(c) $t = 40 \text{ mm}$, $L/R = 3$

그림 7. 강종의 차이에 따른 전단응력

5. 결 론

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

- 1) 모든 강종에서 R/t 과 L/R 이 증가할수록 전단좌굴응력은 작아졌다. 한편, 두께가 얇은 경우 그 차이가 크게 나타

났고 감소율이 균일하게 감소하지 않았는데, 이는 강관의 두께가 얇을 경우 초기변형에 민감한 국부좌굴이 발생했기 때문인 것으로 판단된다.

- 2) SM570은 L/R 이 증가할수록 전단좌굴응력의 감소율이 증가하여, 다른 강종과의 전단좌굴응력 차이가 작아지는 것으로 나타났다. 즉, 고강도 강재일수록 길이의 변화에 보다 민감한 것으로 판단된다.
- 3) 동일한 강종과 동일한 R/t , L/R 을 가지는 경우, 두께가 증가하더라도 전단좌굴응력의 차이는 크게 나지 않았다. 그러나 이는 R/t 과 L/R 의 영향으로 두께가 증가하면 반지름과 길이가 같이 증가하였기 때문이라고 판단되며 향후 동일한 반지름과 길이에 두께만을 변화시켜 전단좌굴응력을 분석하는 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 휨 압축과파괴가 생기지 않고 순수전단좌굴을 유도하기 위하여 비교적 길이가 짧고 두께가 얇은 강관에 관해서만 유한요소해석을 실시하였고, 반지름과 두께의 변화도 제한적이었다. 그러므로 앞으로 길이가 긴 강관과 두께, 반지름의 차이에 따른 전단좌굴응력의 변화나 보강재, 조합응력으로 인한 파괴 등에 따른 연구도 계속 되어야 한다고 판단된다.

참고문헌

대한토목학회, 도로교설계기준 (2008)
 최현식 (1995) 강체변위에 의한 탑상형 원통셸의 응력해석에 관한 연구, **대한건축학회 논문집**, 대한건축공학회, 제11권, 제9호, pp. 175-182.
 ABAQUS User's Manual 6.4, Hibit, Karlson and Sorenson
 Athiannan, K. and Palaninathan, R. (2004) Buckling of cylindrical

shells under transverse shear, *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, pp. 1307-1328.
 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.*
 Galletly, G.D. and Blachut, J., (1983) Buckling of a Cantilevered Cylindrical Shell Subjected to a Transverse Shearing Force at its Tip, *The Third International Colloquium on Stability of Metal Structures*, Paris, Nov. 16-17.
 Lee, R.-L., (1969) Buckling of Stiffened Cylindrical Shell with Transverse Shear Load, *AIJA Journal*, Vol. 7, NO. 4, pp. 1095-1097.
 Lundquist, E.E. (1935) Strength Tests of Thin-Walled Duralumin Cylinders in Combined Transverse Shear and Bending, *NACA Technical Note, No. 523*.
 Lu, S.Y. (1965) Buckling of Cantilever Cylindrical Shell with a Transverse End Load, *AIJA Journal*, Vol. 3, No. 12, pp. 2305-2351.
 Alinia, M.M. Gheitsi, A., and Erfani, S. (2009) Plastic shear buckling of unstiffened stocky plates, *Journal of constructional Steel Research*, Vol. 65, pp. 1631-1643.
 Schröder, P. (1974) The Buckling Behaviour of Transverse Loaded Circular Cylinders, *Technical Translation ESRO TT-105*
 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.*
 Yamaki, N. (1984) Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells, *North-Holland*, pp. 453-476.

◎ 논문접수일 : 2012년 07월 18일
 ◎ 심사의뢰일 : 2012년 07월 19일
 ◎ 심사완료일 : 2012년 08월 13일