

대중량 지지구조물 측면 부재의 좌굴해석에 관한 연구

A Study on the Buckling Analysis of Side Section of Heavy Lifting Structure

*#정훈형¹, 김재식², 최현오³

*#H. H. Jung(jove390@naver.com)¹, C. S. Kim², H. O. Choi³

¹ 창원대학교 대학원 기계공학전공, ² 창원대학교 기계공학과, ³ 한국기계연구원

Key words : Eigenvalue, Critical buckling stress, Buckling factor, General safety factor

1. 서론

최근 들어 산업 전반에서 대형화 추세에 발맞추어 대중량을 지지하는 구조물의 필요성이 크게 대두되었다. 이런 구조물의 경우 전체적인 안전성도 중요하지만 각 부재들에 대한 안전성 평가가 요구된다. 특히 가느다란 기둥, 얇은 판, 압축력을 받는 부재 등은 불안정 상태가 진행되면 약간의 교란이 있더라도 쉽게 붕괴한다. 얇은 판의 경우 길이나 면적에 비해서 그 두께가 훨씬 얇기 때문에 압축력에 의한 좌굴 문제가 보다 중요하게 대두된다. 얇은 판으로 구성된 측면 부재의 보강은 일반적으로 압축력을 받는 수직방향에 대해 이루어진다. 대중량 지지구조물의 측면 부재가 얇은 판에 의해 설계되었을 경우 이에 대한 정적 안전성 및 좌굴을 고려한 설계가 매우 중요하다.

본 연구에서는 대중량 지지구조물의 측면 부재인 얇은 판에 대해서 압축력에 대한 보강을 실시할 경우 정적 안전성 및 좌굴에 대해 미치는 영향을 분석함으로써 실제 측면 부재의 보강 설계 과정에 자료를 제시할 수 있도록 한다.

2. 좌굴 응력

4군데의 모서리부분에 인장과 압축응력을 받는 판의 경우 Fig. 1과 같은 응력분포를 나타낸다. 인장과 압축의 비율에 따라서 좌굴응력은 아래와 같이 계산한다.

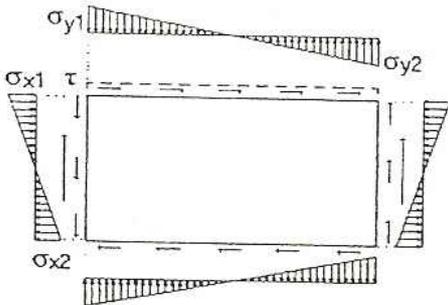


Fig. 1 Compressive and tensile stresses

중량물 인양 장비 규격에 의하면^[1] 이론적인 임계좌굴응력은 Euler Stress와 좌굴계수에 의해 결정된다. Euler Stress는 다음 식 (1)과 같다.

$$\sigma_R^E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \times \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

여기서

- E : Modulus of elasticity
- ν : Poisson's ratio
- b : Width of plate perpendicular to the compression force
- t : Thickness of plate

또 순수 압축에 대한 좌굴계수는 다음 식 (2)와 같다.

$$K_\sigma = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \times \frac{2.1}{\Psi + 1.1}, \quad \left\{ \alpha = \frac{a}{b}, \Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right\} \quad (2)$$

여기서

- a : Longitudinal distance between diaphragms
- σ_1 : Compressive stress
- σ_2 : Tensile stress

따라서 좌굴응력은 식 (1) ~ (2)에 의해 다음과 같이 계산한다.

$$\sigma_{cr} = K_\sigma \times \sigma_R^E \quad (3)$$

같은 방법에 의해 유도된 전단에 대한 좌굴응력은 식 (4)와 같다.

$$\tau_{cr} = K_\tau \times \sigma_R^E \quad (4)$$

따라서 압축에 의한 임계좌굴응력은 다음 식 (5)와 같다.

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}}{\frac{1+\Psi}{4} \times \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \sqrt{\left(\frac{3-\Psi}{4} \times \frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2}} \quad (5)$$

부재의 허용좌굴응력의 값은 아래 식(6)과 같다.

$$\sigma_K = \left(\frac{1/\omega \times \sigma_c / 1.5}{1.15}\right) \quad (6)$$

여기서 ω 는 좌굴계수이다. 좌굴계수는 세장비에 따라 결정된다.

3. 좌굴 및 정적해석

해석 모델은 유한요소법에 의해 구성하였다. 실제 대중량 지지구조물의 측면 부재와 동일한 설계를 적용하였다. 부재의 일부를 추출한 것이므로 부재의 4 모서리는 고정하였으며 설계과정에서 부재에 미치는 하중이 최대인 경우의 하중을 적용한 후 유한요소법을 이용하여 정적 해석을 수행한다. 또한 좌굴에 대한 임계하중과 좌굴모드 형상을 구하기 위해 다음과 같이 좌굴해석을 수행하였다. 이 모델은 측면 부재에 보강재를 추가했을 경우로 고유치 좌굴해석을 통해 선형 탄성 구조물에 대하여 이론적인 좌굴 분기점을 구한다. 고유치 좌굴해석은 선형 거동만 유효하고, 초기 상태의 강성이 변함없이 적용된다. 또한 선형 정적 해석에서 계산된 응력이 고유치 좌굴해석에서 초기 응력으로 사용된다. Table 1은 적용한 재료의 물성치를 나타낸다. Table 2와 같이 측면 부재에 대한 유한요소 모델을 구성하고 Fig. 2에 그 형상을 나타낸다.

Table 1 Material property

List	Elastic	Poisson's ratio	Yield limit
property	210000 N/mm ²	0.3	355 N/mm ²

Table 2 Finite element model

List	Plate	Stiffener	Element type	Element number	Stiffener number
modeling	a=468mm b=2806mm t=10mm	L 130*65*8 (mm)	shell	1230	5

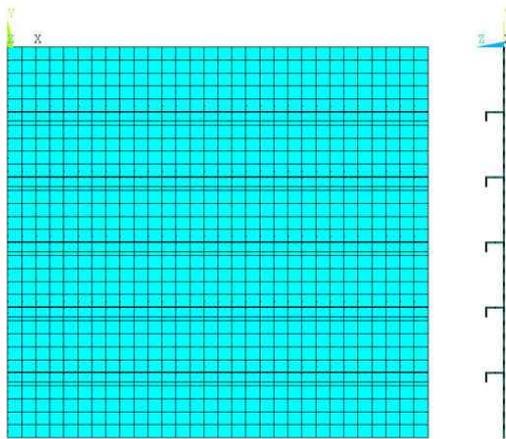


Fig. 2 Finite element model

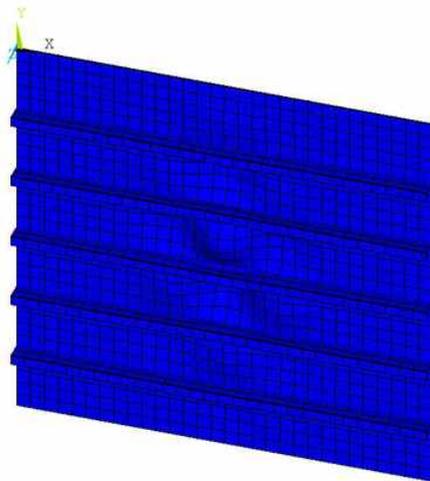


Fig. 3 Eigenvalue buckling analysis

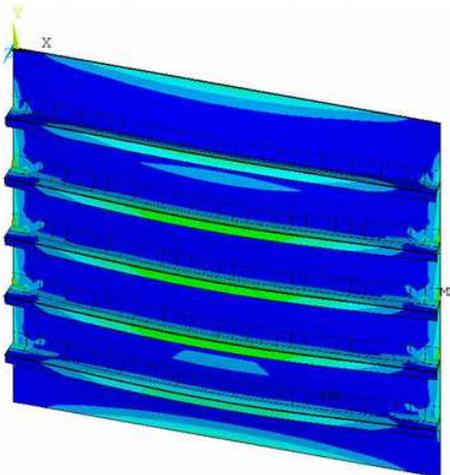


Fig. 4 Static analysis

고유치 좌굴해석 결과 하중계수는 1.64로 초기 적용하중이

26038N이므로 임계하중은 42702N이다. 이때 발생하는 좌굴 모드 형상을 Fig. 3에 나타낸다. 측면 부재에 미치는 하중이 최대인 경우를 적용하여 선형 정적 해석을 수행한 결과 응력 분포는 Fig. 4와 같다. Table 3은 이때 발생한 응력을 나타낸다.

일반적인 측면 부재의 정적 해석에서 유효한 용량은 다음 식 (7)과 같이 결정된다.

$$Used\ capacity = \frac{\sigma_{max.mises} \times S.f}{\sigma_e} \leq 1 \quad (7)$$

여기서 $S.f$ 는 안전계수를 나타낸다. Table 4에 하중조건에 따른 안전계수를 나타내고 있다. 여기서는 설계과정에서 고려되어지는 최대 하중을 적용하여 해석을 수행하였으므로 조건 3번의 안전계수를 적용하였다.

Table 3 Stresses

List	Max. von mises	σ_1	σ_2	τ
stress	232 N/mm ²	-232 N/mm ²	-231 N/mm ²	7 N/mm ²

Table 4 General safety factor

List	Load case I	Load case II	Load case III
$S.f$	1.50	1.33	1.10

4. 결론

대중량 지지구조물에서 측면 부재의 보강에 따른 정적 안전성 및 좌굴에 대한 안전성 해석을 위해 유한요소모델을 구성하고 그 결과를 토대로 임계좌굴응력을 구하였다.

재료의 항복강도가 355MPa이고 해석결과 측면 부재에서 발생한 최대 von mises stress는 232MPa이다. 안전계수가 1.10으로 식 (7)에 의해서 유효한 용량이 0.7189이므로 1이하이다. 이 경우 정적으로 안전하다. 또한 측면 부재의 세장비에 의해 강재허용좌굴응력을 구하는 좌굴계수가 1.29로써 식 (6)에 의해서 허용좌굴응력은 159.5MPa이고 식 (5)에서 구한 임계좌굴응력이 91.8MPa이므로 허용좌굴응력 보다 작다. 따라서 좌굴에 대해서도 안전하다.

측면 부재에서 보강의 위치, 형태, 강도의 정도에 따라서도 그 결과에 차이를 나타낼 수 있다. 향후 이러한 점을 고려한 해석이 수행되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03]지원 및 (주)위아의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Federation Europeenne de la Manutention SECTION I, "HEAVY LIFTING APPLIANCES," 3RD EDITION, 1987.10.01.
2. O. C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, "The Finite Element Method," McGRAW HILL, 89-98, Fourth edition.
3. Daryl L. Logan, "A First Course in the Finite Element Method," BROOKS/COLE, 137-187, Third edition.
4. T. J. LARDNER, R. R. ARCHER, "Mechanics of solids," McGRAW-HILL, 255-302, An introduction.
5. ROY R. CRAIG, JR., "Mechanics of Materials," JOHN WILEY & SONS, 614-6472, Second edition.