

모서리 곡률이 존재하는 상자형 단면 기둥의 좌굴

Buckling Strength of Box-Shape Column with Corner Rounding

한금호* · 한택희* · 김기언** · 강영종***

Han, Keum Ho · Han, Taekhee · Kim, Ki Un · Kang, Young Jong

Abstract

Generally, the buckling of thin-walled structures has studied for rectangular sections or circular sections. Rectangular sections have small stiffness and circular sections have large stiffness when they are compared with rectangular sections for local buckling. But both of them have similar stiffness to column buckling. Therefore in this paper, we are going to analyze the local buckling for the box section with rounded corner and compare with rectangular section. Also we confirm that the rounded corner section has larger local buckling strength than rectangular section.

1. 서 론

최근에는 항공기나 선박 등에 주로 사용되었던 복합소재를 이용한 구조물이 연구 개발되고 있고, 더 많은 건설소재들이 속속 개발되고 있으며, 새로 개발되는 소재들은 꾸준히 고강도화 되어왔다. 재료의 고강도화가 진행됨에 따라, 현대의 구조물은 더욱 얇은 박판구조로 설계-시공되며, 박판 부재들은 구조물의 사하중의 저감 및 재료비의 절감을 위해 다양한 분야에서 적용되고 있다. 이와 같이 두께가 얇은 박판구조물은 좌굴 문제가 더욱 중요하게 된다. 이러한 판 구조물의 좌굴에 대한 해석적 및 실험적인 연구는 항공분야에서 많이 수행되었으나, 구조물의 크기나 제원이 토목구조물과는 차이가 있으며 이를 설계에 직접 이용하기는 어려움이 있다.

토목에서 구조물의 하중 지탱요소로는 보(beam)와 기둥(column)이 널리 사용되고 있으며, 기둥은 구조 특성상 작용하중에 의하여 구조계(system)가 불안정하게 되는 임계조건이 존재한다. 따라서 기둥은 구조물 자체의 하중과 함께 외부에서 가해지는 하중을 안전하게 지탱할 수 있도록 하기 위해서 안정성을 고려해야만 한다. 특히 두께가 얇은 박판구조물은 압축력에 의한 좌굴이 발생하기 쉽고 좌굴에 의해 일어나는 정적 최대압괴해석의 종류는 국부좌굴에 대한 연구와 전체좌굴에 관한 연구가 있다.

본 연구의 주제가 되는 튜브형 부재의 경우는 부재의 길이에 따라 좌굴모드가 변화된다. 즉, 일정길이 이하의 부재에서는 국부좌굴이 그 이상에서는 전체좌굴이 발생한다. 이것은 기둥의 단면 형상과 기둥의 길이에 의

* 고려대학교 토목환경공학과 박사과정

** 고려대학교 토목환경공학과

*** 고려대학교 토목환경공학과 교수

해 정의되는 세장비, 재료의 탄성계수, 경계조건 등에 의해 산출되며, 이에 대한 이론적 해석은 Euler에 의해 최초로 이루어졌다. 기둥은 세장비(slenderness ratio)에 따라 장주, 중간주, 단주로 구분되며, Euler에 의하여 제시된 기둥의 좌굴이론식은 세장비가 큰 장주범위에서 임계하중을 예측하는데 유용하게 사용되고 있다. 기존의 Thin-walled에 대한 좌굴연구는 주로 사각형이나 원형인 단면의 경우에 대해 이루어 졌다. 원형인 경우, 역학적 이점으로는 국부 좌굴강도 및 비틀저항이 크며 하중작용에 대한 방향성이 없는 것 등을 들 수 있고, 더욱이 하천내 유수중에 설치되는 경우는 물 흐름을 원활히 하여 기초의 굴삭을 최소한으로 하는 것이 가능하다. 또 육상부에서는 미관상 또는 지형적인 제약으로 인해 원형으로 하는 경우도 많다. 그러나 원형은 각형과 비교했을 때 제작상에 발생할 수 있는 결함 발생 가능성이 크고 대형 구조물 시공시에 많은 어려움을 유발하는 단점도 있다. 한편 각형의 경우는 하중이 작용하는 방향과 그 크기에 따라 단면 규격, 부재 두께를 적절히 조절하는 것이 가능하고 제작이 용의하지만 강성이 비교적 작다는 단점이 있다.

각각의 장 단점을 보완하기 위한 방안의 하나로 각각의 장점을 수용할 수 있는 사각단면의 모서리를 곡선 처리한 상자형 구조물의 사용이 대두되었고, 이러한 조건에서의 국부좌굴에 대한 해석을 수행하고 이를 일반적인 사각단면의 국부좌굴강도와 비교하는 것을 본 논문의 목적으로 하였다.

2. 유한요소 해석

본 절에서는 서론에서 설명한 바와 같이 원형의 모서리를 갖는 사각형 단면 기둥의 국부좌굴에 대한 정성적 정량적 분석을 수행하고자 한다. 이를 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 Lusas(version 13.5)을 사용하였고, 해석 시 8절점 쉘 요소(Quadratic Quadrilateral Thin Shell Element, QSL8)를 사용하였다. 사각형 단면의 모서리에 곡률을 줌으로써 사각형 단면으로부터 원형 단면에 이르기까지의 모서리의 곡률이 국부좌굴에 미치는 영향을 분석하여 그 좌굴 형상과 좌굴강도에 대한 분석을 수행하고자 한다. 이를 통해 모서리의 곡률에 따른 국부좌굴의 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 모서리에 곡률을 가지는 단면에서 국부좌굴 강도에 영향을 미치는 변수로 일반적인 원형 단면 및 사각형 단면의 국부좌굴에 영향을 미치는 r/b , t/b 이외에 기둥의 국부좌굴 및 전체좌굴, 혼합좌굴(Interaction Buckling)에 영향을 미치는 L/b 등을 고려하였다.

2.1 매개변수

해석에 사용된 부재의 단면 형상은 그림 2.1과 같으며, 해석시의 변수로는 정사각형 단면을 갖는 상자형 기둥을 기준으로, 모서리의 곡률비($\frac{r}{b}$), 판의 두께비($\frac{t}{b}$)를 고려하였으며, 모서리의 곡률 효과에 따른 최소 국부좌굴이 발생하는 조건결정을 위해 ($\frac{L}{b}$)을 고려하였으며 이후로는 최소 국부좌굴이 발생하는 L 을 각각에 대하여 고정하였다.. 여기서, 모서리의 곡률은 정사각형의 형상부터 원형단면 까지 고려하였으며($0 \leq \frac{r}{b} \leq 0.5$), 또한 판의 두께는 일반적으로 박판으로 간주되는 범위($0.01 \leq \frac{t}{b} \leq 0.05$)에서 해석하였다.

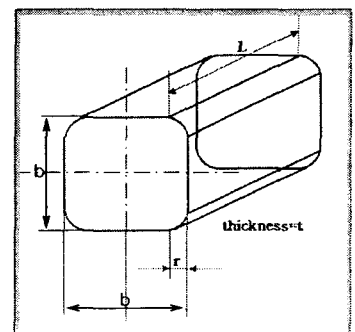


그림 2.1 부재의 단면 형상

2.2 해석 모델 및 수렴도 검증

2.2.1 해석모델의 검증

본 연구를 수행 함에 있어 기본 모델을 통하여 프로그램에 대한 검증을 실시한 후 해석을 수행하였다. 검증 시 사용한 모델의 제원은 표 2-1과 같으며, 경계 조건은 표 2.2과 같다. 또한 해석에 사용된 재료의 물성치는 탄성계수 $E=2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$, 포와송 비(Poisson's ratio) $\nu=0.3$ 이다.

표 2.1 Rectangular Section 모델의 제원(r=0일때)

| 폭(b) | 길이(L) | 두께(t) | 하중 |
|------|-------|-------|------------------------------|
| 10cm | 10cm | 0.1cm | 등분포 단위하중(kg/cm^2) |

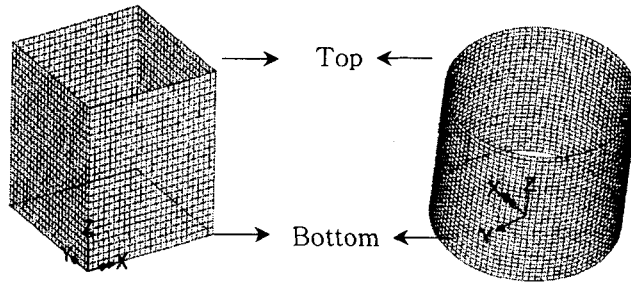


그림 2.2 검증모델의 좌표계

표 2.2 검증모델의 경계조건

| | | Rectangular Section | | Circular Section | |
|-------------|---|---------------------|------|------------------|------|
| | | Bottom | Top | Bottom | Top |
| Translation | X | Fix | Fix | Fix | Fix |
| | Y | Fix | Fix | Fix | Fix |
| | Z | Fix | Free | Fix | Free |
| Rotation | X | Free | Free | Free | Free |
| | Y | Free | Free | Free | Free |
| | Z | Free | Free | Free | Free |

검증 모델의 해석 결과는 그림 2.3, 그림 2.4, 및 표 2.3와 같다. 표 2.3의 결과를 비교하여 보면 유한요소해석 결과 값이 이론해와 비교하였을 때의 오차가 3%~4%정도이고, 이는 매우 신뢰할 수 있는 수준이라는 것을 알 수 있다.

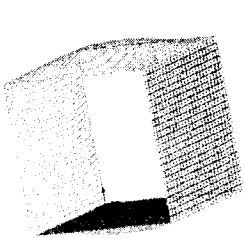


그림 2.3 Rectangular section의 국부좌굴

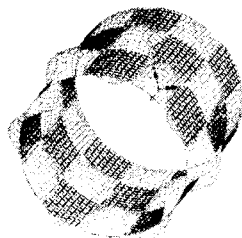


그림 2.4 Circular section의 국부좌굴

표 2.3 검증 모델의 유한요소해석 결과와 정해와의 국부좌굴강도 비교

| | Rectangular section | Circular section |
|-------------------------|---------------------|------------------|
| 이론값(kg/cm^2) | 737.307 | 24417 |
| FEM(kg/cm^2) | 724.751 | 25419.56 |
| 오 차 | 3.02% | 3.94% |

2.2.2 수렴도 검증

유한요소해석의 결과치는 해석모델의 유한요소 개수에 따라 상당한 차이를 보인다. 따라서 유한요소의 개수별 해석치의 비교를 통하여 적당한 유한요소의 개수를 결정하는 것이 타당하다. 따라서, 본 절에서는 요소의 수에 따른 해석결과의 수렴도를 검토하였다. 본 연구에서 수행하고자 하는 단면은 모서리가 곡률을 가지므로 셸요소(QSL8)로 곡선의 거동을 충분히 표현하기 위해서는 충분한 자유도를 갖도록 많은 요소를 사용하여야 한다. 모서리의 곡률이 전체 폭에 대해 차지하는 비율이 아주 작을 경우 많은 자유도를 필요치 않기 때문에 반지름의 크기($r/b=0$, $r/b=0.1$, $r/b=0.2$, $r/b=0.3$, $r/b=0.4$, $r/b=0.5$)에 따라 다섯 가지로 분류하여 수렴도 검증을 하였다. $r/b=0$ (Rectangular section)인 경우는 4×4 부터 50×50 , $r/b=0.1$ 인 경우는 2×12 부터 8×48 , $r/b=0.2$ 인 경우는 2×8 부터 16×48 , $r/b=0.3$ 인 경우는 2×4 부터 20×40 , $r/b=0.4$ 인 경우는 4×6 부터 22×33 , 그리고 $r/b=0.5$ (Circular section)의 경우는 4×6 부터 40×60 까지 각각 곡률부분을 나누었으며 직선부는 곡률부의 수에 맞게 적당히 나누었다. 해석 결과는 다음과 같다.

표 2.4 $r/b=0$ (Rectangular section)일때 Mesh수에 따른 해석결과의 수렴도

| Mesh 수 | Eigen Value | 변화율 |
|--------|-------------|---------|
| 4×4 | 698.015 | |
| 8×8 | 728.045 | 4.12475 |
| 12×12 | 733.951 | 0.80469 |
| 16×16 | 735.853 | 0.25848 |
| 20×20 | 736.661 | 0.10968 |
| 24×24 | 737.072 | 0.05576 |
| 28×28 | 737.307 | 0.03187 |
| 32×32 | 737.451 | 0.01953 |
| 36×36 | 737.543 | 0.01247 |
| 40×40 | 737.601 | 0.00786 |
| 44×44 | 737.638 | 0.00502 |

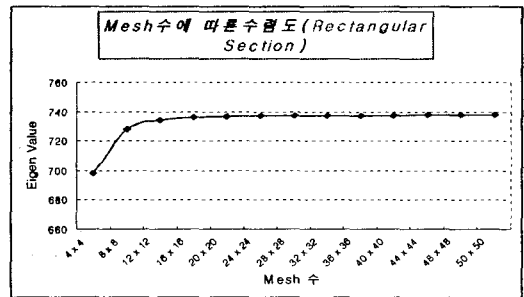


그림 2.5 $r/b=0$ (Rectangular section)일때 Mesh수에 따른 해석결과의 수렴도

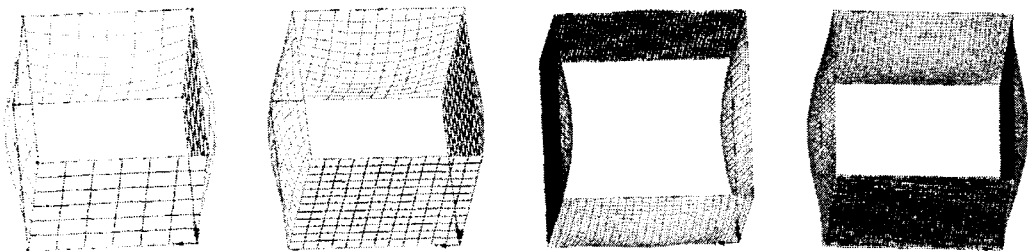


그림 2.6 요소수에 따른 좌굴형상

위의 결과로 $r/b=0$ (Rectangular section)일때 직선을 표현하는데 있어서 한 면당 24개 이상의 요소를 사용하면 충분히 표현할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본연구에서 $r/b=0$ 일때는 24×24 이상의 요소를 사용하기로 한다. 이와 같은 방법으로 곡률이 변화해 감에 따른 최적의 요소수를 산정하였다.

2.3 매개변수연구

2.3.1 곡률비(r/b)가 국부좌굴강도에 미치는 영향

먼저 모서리의 곡률 효과에 따른 최소 국부좌굴이 발생하는 조건결정에 앞서 모서리의 곡률비($\frac{r}{b}$)에 따른 국부 좌굴의 경향을 보기 위해서 길이와 폭의 비(L/b)는 1로 고정하였고 곡률비($\frac{r}{b}$)를 곡률은 $r/b=0$ 인 정사각형에서 $r/b=0.5$ 인 원형까지 고려하였고 두께는 $t/b=0.01$ 에서 $t/b=0.05$ 까지 변화시키는 방법으로 수행하였다. 해석 결과는 그림 2.7과 같다. 왼쪽의 그림은 대표적인 좌굴형태를 나타낸 것으로 $r/b=0, 0.2, 0.5$ 일때의 좌굴형상이다.

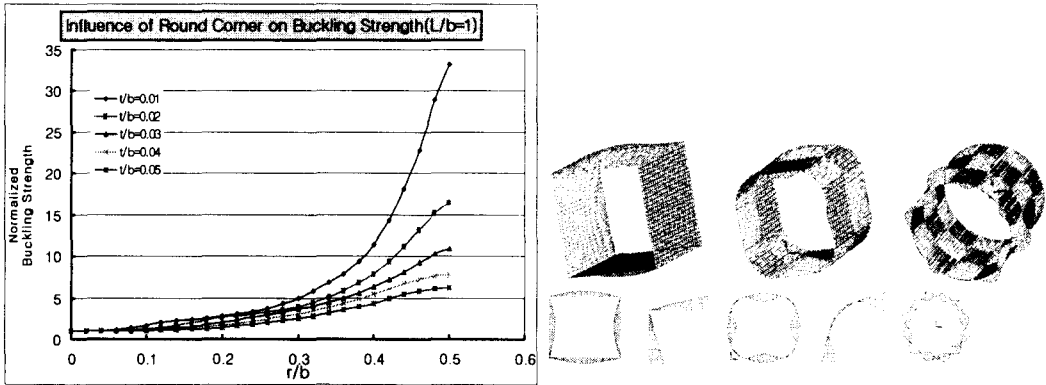
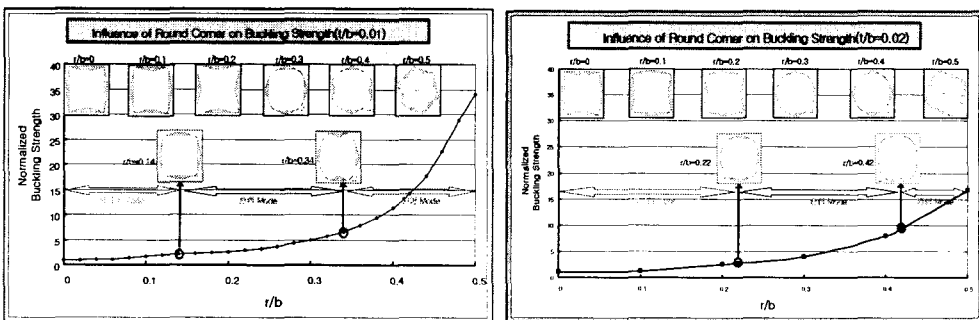


그림 2.7 모서리 곡률도(r/b)에 따른 좌굴강도 및 형상

2.3.2 폭-두께비가 국부좌굴강도에 미치는 영향($L/b=1$)

그림 2.9는 폭-두께비와 모서리 곡률도에 따른 국부좌굴 강도 및 좌굴 형상의 변화를 나타낸 것이다.



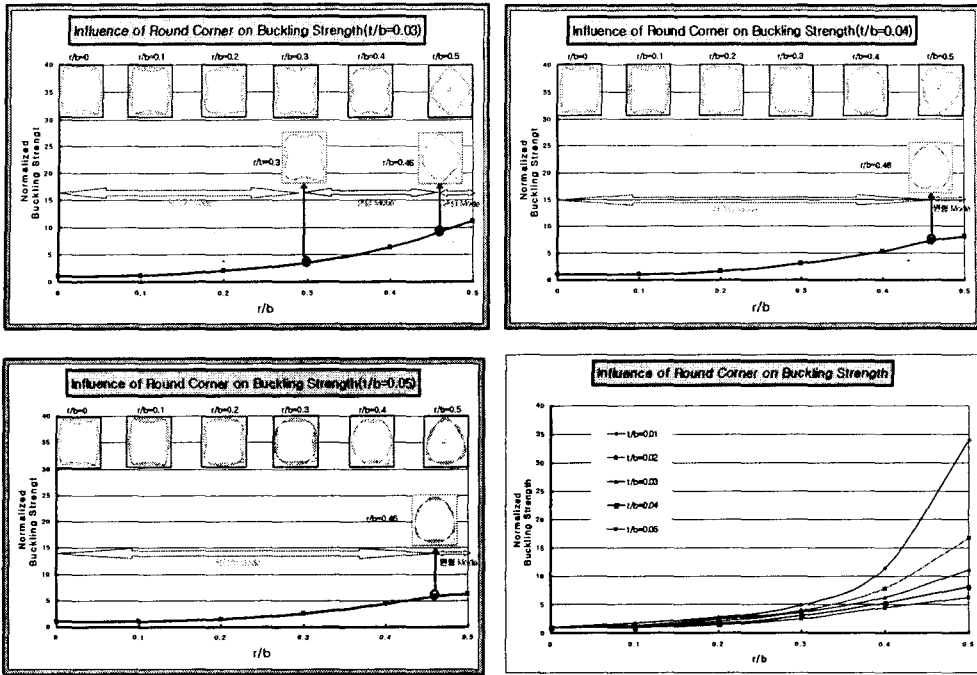


그림 2.8 폭-두께비(t/b)에 따른 좌굴강도 및 형상

그림 2.8로부터 t/b 가 작을수록 즉 폭에 비해 두께가 얇을수록 국부좌굴 강도에 있어서 모서리의 곡률의 국부좌굴 증진효과가 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 좌굴 형상의 측면에서는 r/b 가 커질수록 정사각형 단면의 좌굴 형상으로부터 원형 단면의 좌굴 형상으로 점진적으로 변화함을 알 수 있었으며, t/b 에 따른 사각형 좌굴형상, 혼합좌굴형상, 그리고 원형 좌굴형상의 경계는 다음과 같음을 알 수 있었다.

표 2.4 좌굴형상의 분류

| | 정사각형 좌굴형상 | 혼합 좌굴형상 | 원형 좌굴형상 |
|------------|--------------|------------------------|-----------------|
| $t/b=0.01$ | $r/b < 0.14$ | $0.14 \leq r/b < 0.34$ | $r/b \geq 0.34$ |
| $t/b=0.02$ | $r/b < 0.22$ | $0.22 \leq r/b < 0.42$ | $r/b \geq 0.42$ |
| $t/b=0.03$ | $r/b < 0.3$ | $0.3 \leq r/b < 0.46$ | $r/b \geq 0.46$ |
| $t/b=0.04$ | $r/b < 0.46$ | | $r/b \geq 0.46$ |
| $t/b=0.05$ | $r/b < 0.46$ | | $r/b \geq 0.46$ |

3. 결 론

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 좌굴형상의 경우

길이와 동일한 경우의 모서리의 곡률이 국부좌굴에 미치는 영향을 정성적으로 분석하였다. 모서리의 곡률이 존재하는 경우 곡률이 차지하는 부분이 증가함에 따라 사각형 단면의 국부좌굴형상으로부터 원형 단면의 국부좌굴형상으로 변화해 나감을 알 수 있었으며 그 중간 과정에서 두가지 좌굴 형상이 혼재하는 것을 알 수 있었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 좌굴형상을 구분할 수 있는 경계를 결정하였다.

2. 좌굴강도의 경우

좌굴강도는 r/b 가 0인 사각형 단면의 국부좌굴강도를 기준으로 r/b 가 0.5인 원형단면의 국부좌굴강도에 이르기 까지 r/b 가 커질수록 꾸준히 증가하는 경향을 나타냈으며 그 값은 연속성을 가짐을 알 수 있었다. 그리고 t/b 가 커질수록 상재적인 국부좌굴 강도 값은 꾸준히 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있었으며 강도의 분포는 t/b 가 작을수록 즉 두께가 얇을수록 국부좌굴 강도에 있어서 모서리의 곡률효과가 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. S. P. Timoshenko and Woinowsky-Krieger , "Theory of Plates and Shells", 2nd Ed. *Mc Graw-Hill. Inc.*
2. S. P. Timoshenko and James M. Gere , "Theory of Elastic Stability", 2nd Ed., *McGraw-Hill, Inc.*
3. S. P. Timoshenko and J. N. Doodier , "Theory of Elasticity" , 2nd Ed., *McGraw-Hill, Inc.*
4. Charles G. Salmon and John E. Johnson, "Steel Structures", 3rd Ed., *Harper Collins Publishers Inc.*
5. LUSAS Manual, Version 13.4
6. M. Ohga, T. Hara and K. Kawaguchi "Buckling Mode Shapes of Thin-Walled Members" 1993
7. M. Ohga, K. Kawaguchi , "Buckling Analysis of Thin-Walled Members with Closed Cross Section" 1995