

공학석사 학위논문

개구부가 있는 강관기둥의 좌굴하중 해석

지도교수 류 연 선

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2002년 2월

부경대학교대학원

해양공학과

조 현 민

조현민의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 26일

주 심 공학박사 윤길수



위 원 공학박사 김헌태



위 원 공학박사 류연선



목 차

List of Figures	ii
List of Tables	iv
List of Symbols	v
ABSTRACT	vi
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 방법	2
2. 기둥의 탄성좌굴	3
2.1 Euler 공식	3
2.2 유한요소해석	3
3. 유한요소모델링	5
3.1 해석모델의 기하학적 형상	5
3.2 유한요소모델	9
4. 수치예제	12
4.1 수렴성 검토	12
4.2 개구부 형상비의 영향	13
4.2.1 세장비에 따른 개구부 형상비의 영향	13
4.2.2 직경-두께비에 따른 개구부 형상비의 영향	19
4.3 개구부 위치의 영향	24
4.3.1 세장비에 따른 개구부 위치의 영향	24
4.3.2 직경-두께비에 따른 개구부 위치의 영향	31
4.4 개구부 열림각의 영향	37
4.4.1 세장비에 따른 개구부 열림각의 영향	37
4.4.2 직경-두께비에 따른 개구부 열림각의 영향	43
5. 요약 및 결론	49
참고문헌	51

List of Figures

- Fig. 3.1 Geometry of tubular column with opening
- Fig. 3.2 Geometry properties of opening under investigation
- Fig. 3.3 Input of SHELL93
- Fig. 3.4 Output of SHELL93
- Fig. 3.5 Finite element mesh around circular opening
- Fig. 3.6 Finite element mesh around rectangular opening
- Fig. 4.1 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T5-S125
- Fig. 4.2 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T5-S140
- Fig. 4.3 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T5-S155
- Fig. 4.4 Effect of opening aspect ratio for different slenderness
- Fig. 4.5 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T4-S125
- Fig. 4.6 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T3-S125
- Fig. 4.7 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T2-S125
- Fig. 4.8 Effect of opening aspect ratio for different D/t ratio
- Fig. 4.9 Variation of opening location in the tubular column
- Fig. 4.10 Effect of opening location on relative buckling load for T5-S125
- Fig. 4.11 Effect of opening location on relative buckling load for T5-S140
- Fig. 4.12 Effect of opening location on relative buckling load for T5-S155
- Fig. 4.13 Effect of opening location for different slenderness
- Fig. 4.14 Effect of opening location on relative buckling load for T4-S125
- Fig. 4.15 Effect of opening location on relative buckling load for T3-S125
- Fig. 4.16 Effect of opening location on relative buckling load for T2-S125
- Fig. 4.17 Effect of opening location for different D/t ratio
- Fig. 4.18 Effect of opening angle on relative buckling load for T5-S125
- Fig. 4.19 Effect of opening angle on relative buckling load for T5-S140
- Fig. 4.20 Effect of opening angle on relative buckling load for T5-S155

Fig. 4.21 Effect of opening angle for different slenderness

Fig. 4.22 Effect of opening angle on relative buckling load for T4-S125

Fig. 4.23 Effect of opening angle on relative buckling load for T3-S125

Fig. 4.24 Effect of opening angle on relative buckling load for T2-S125

Fig. 4.25 Effect of opening angle for different D/t ratio

List of Tables

- Table 3.1 Geometric properties of test model with different slenderness
- Table 3.2 Geometric properties of test model with different D/t ratio
- Table 4.1 FEM Solution for tubular column without opening
- Table 4.2 Effect of opening aspect ratio T5-S125 - [$P_E=19.715t$]
- Table 4.3 Effect of opening aspect ratio T5-S140 - [$P_E=15.729t$]
- Table 4.4 Effect of opening aspect ratio T5-S155 - [$P_E=12.84t$]
- Table 4.5 Effect of opening aspect ratio T4-S125 - [$P_E=15.938t$]
- Table 4.6 Effect of opening aspect ratio T3-S125 - [$P_E=12.078t$]
- Table 4.7 Effect of opening aspect ratio T2-S125 - [$P_E=8.134t$]
- Table 4.8 Effect of opening location for T5-S125 - [$P_E=19.715t$]
- Table 4.9 Effect of opening location for T5-S140 - [$P_E=15.729t$]
- Table 4.10 Effect of opening location for T5-S155 - [$P_E=12.84t$]
- Table 4.11 Effect of opening location for T4-S125 - [$P_E=15.938t$]
- Table 4.12 Effect of opening location for T3-S125 - [$P_E=12.078t$]
- Table 4.13 Effect of opening location for T2-S125 - [$P_E=8.134t$]
- Table 4.14 Effect of opening angle for T5-S125 - [$P_E=19.715t$]
- Table 4.15 Effect of opening angle for T5-S140 - [$P_E=15.729t$]
- Table 4.16 Effect of opening angle for T5-S155 - [$P_E=12.84t$]
- Table 4.17 Effect of opening angle for T4-S125 - [$P_E=15.938t$]
- Table 4.18 Effect of opening angle for T3-S125 - [$P_E=12.078t$]
- Table 4.19 Effect of opening angle for T2-S125 - [$P_E=8.134t$]

List of Symbols

a_l	length of rectangular opening
a_s	width of opening aspect ratio
D	diameter of tubular column
E	modulus of elasticity
I	moment of inertia
K	effective length factor
k	slenderness ratio
L	length of tubular column
l	location of opening
M	flexural moment
P_{cr}	critical buckling load
P_E	Euler buckling load
$P_{cr,C}$	buckling load of tubular column with circular opening
$P_{cr,R}$	buckling load of tubular column with rectangular opening
$P_{cr,\alpha}$	buckling load of tubular column for aspect ratio α
$P_{cr,\beta}$	buckling load of tubular column for aspect ratio β
P_0	critical buckling load
t	thickness of tubular column
α	rectangular opening ratio
β	rectangular opening ratio
ε_α	decrease ratio of buckling load as α
ε_β	decrease ratio of buckling load as β
ε_C	decrease ratio of buckling load for tubular column with circular opening

ϵ_R	decrease ratio of buckling load as for tubular column with rectangular opening
θ_C	circular opening angle
θ_R	rectangular opening angle
λ	slenderness of tubular column
σ_{pl}	proportional limit

Buckling Strength of Tubular Columns with an Opening

Cho, Hyun-Min

*Department of Ocean Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

ABSTRACT

Elastic buckling behavior of simply supported tubular columns with an opening under axial compressive load is investigated using the finite element method. The influence of size, location, and shape of opening on the buckling strength is evaluated for various models having different slenderness and diameter-thickness ratio. The shape of the opening on the tubular column is circular or rectangular.

From this study, it is found that the buckling strength of tubular column with opening decreases as the opening angle increases. When the opening is located in the mid-length, tubular column has minimum buckling load. It is also found that the buckling load is much more sensitive to the size of opening in the circumferential direction rather than the longitudinal direction.

1. 서론

1.1 연구 배경

원형강관기둥은 좌굴이나 비틀림에 대한 강성이 우수하고, 부재 내부에 존재하는 공간을 다른 용도로 활용이 가능하며, 동일 압축력에 대해 최소의 재료가 소요되는 등의 구조적, 경제적인 장점을 가지고 있다. 특히 단면이 폐쇄형의 원형이기 때문에 방향성이 없으며 안정성이 높고 큰 강도를 가질 뿐만 아니라 파랑이나 바람에 의한 유체력이 감소되는 등의 장점을 가지고 있어 토목 및 해양구조물의 기둥부재로 사용되는 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

한편, 직경-두께비가 큰 강관부재인 원통셀은 사용환경에 따라 요구되는 다양한 조건들을 만족시키기 위해 인위적으로 개구부를 갖게 된다. 현재 산업현장에서 쓰이고 있는 개구부를 갖는 원통셀 구조물의 예를 들면, 비행기 동체, 미사일 외피, 원자력 압력용기, 수력발전소의 압력관 등이 있다[길, 2000].

개구부를 가지는 등방성 원통셀의 임계 좌굴하중에 대한 연구를 살펴보면 다음과 같다. Tennyson[1968]은 광탄성 실험법을 이용하여 원공의 크기가 좌굴하중에 미치는 영향을 조사하고 이를 실험을 통한 경험식으로 제시하였다. Reddy 등[1998]은 유한요소해석을 통해 다양한 크기의 사각형 개구부를 가지는 원통형 셀에 대해 두께가 다른 보강재를 적용하고 이때의 보강효과에 대한 연구를 수행하였다. Yeh 등[1999]은 유한요소법과 실험을 통해 급힘하중을 받는 원통셀의 탄소성거동에 대한 연구에서 개구부의 크기와 위치가 좌굴하중에 미치는 영향을 조사하였다.

이와 같이 유지 및 보수 또는 출입에 필요한 통로나 배관, 배선, 다른 구조부재와의 연결 등의 이유로 개구부가 다양하게 활용되는 것을 감안할 때, 직경-두께비가 작은 원형강관기둥에 대해서도 개구부를 적용하여 다양한 용도로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

한편, 원형강관기둥이 축방향 압축력을 받는 경우, 압축력에 대한 좌굴의 안정성 검토가 수행되어야 한다. 강관기둥의 좌굴하중에 대한 다양한 연구가 국내에서 다수 수행된 바가 있으나 이는 대부분 개구부를 가지지 않는 각형 및 원형 강관기둥을 대상으로 하고 있다[박과 김, 1994; 박과 김, 1995; 김 등, 1995]. 또한 개구부를 가지는 원통셀의 임계좌굴하중에 대한 연구는 다수 수행된 바가 있지만 직경-두께비가 작을, 즉 비교적 두꺼운 강관기둥이 개구부를 가지는 경우의 좌굴하중에 관한 연구가 수행된 사례는 찾아보기 어렵다.

실제 산업현장에서는 사용목적에 따라 여러 가지 치수의 원형강관기둥을 사용하며, 이들에 대해 다양한 기하학적 형상의 개구부를 적용할 필요가 있다. 따라서 개구부의

기하학적 형상에 따른 원형강관기둥에 대한 연구자료는 유용한 설계자료로서 이용될 수 있다.

1.2 연구목적 및 방법

본 연구에서는 개구부를 가지는 양단 편연결 원형강관기둥의 축방향 압축력에 대한 좌굴해석을 수행한다. 직경-두께비가 비교적 작은 원형강관기둥이 다양한 기하학적 형상의 개구부를 가지는 경우에 대해 좌굴해석을 수행함으로써 개구부의 기하학적 형상에 따른 좌굴특성을 조사하고자 한다. 또한 여러 가지 부재치수의 원형강관기둥에 대해서 개구부 형상 및 위치 등이 좌굴특성에 미치는 영향을 해석한다.

이를 위해 직경-두께비 및 세장비가 각각 다른 원형강관기둥을 해석모델로 선정하여, 각각의 해석모델에 대해 열림각, 위치 그리고 형상비가 다른 원형 및 사각형 개구부를 적용하고 상용유한요소해석프로그램인 ANSYS를 사용하여 좌굴해석을 수행한다.

2. 기둥의 탄성좌굴

2.1 Euler 공식

직경-두께비가 $D/t < 60$ 이고 유효세장비(effective slenderness)의 조건이 식(2.1)과 같은, 비교적 두껍고 긴 관형재가 축압축력을 받는 경우에는 전체좌굴(overall buckling)을 일으켜 Euler 기둥과 같은 형태로 파괴가 발생한다[Ellinas et al, 1984].

$$Kk \geq \pi \sqrt{E/\sigma_{pl}} \quad (2.1)$$

중심축하중을 받는 이상적인 장주의 좌굴하중을 Euler 하중이라고 하며, 식(2.2)와 같다[류, 1997].

$$P_E = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2)$$

2.2 유한요소해석

구조좌굴문제의 이론적 해석을 위해서는 식(2.3)과 같은 고유치 문제를 이상화하여 풀어야 한다.

$$[K_F]\{a\} = P_{cr} [K_G]\{a\} \quad (2.3)$$

여기서, $[K_F]$ 는 굽힘강성행렬(flexural stiffness matrix), $[K_G]$ 는 기하학적 강성행렬(geometric stiffness matrix)이고, 고유값 P_{cr} 은 좌굴하중을, 절점변위벡터 $\{a\}$ 는 모드형상(mode shape)을 나타낸다. 이 고유치 문제에서 구하고자 하는 것은 식(2.3)를 만족시키는 고유값들 P_{cr} 과 이 고유값에 대한 절점변위벡터들이다[Shames and Dym, 1993].

ANSYS에서는 좌굴해석을 위해 비선형좌굴해석(nonlinear buckling analysis)과 선형좌굴해석(linear analysis)의 두 가지 기법 중 한가지를 사용할 수 있다. 선형좌굴해석은 고유치좌굴해석(eigenvalue buckling analysis)이라고도 하며, 이 기법을 사용한

해석결과는 이상적인 선형탄성 구조물의 이론적 좌굴강도와 일치하므로 중심축하중을 받는 원형강관기둥에 대한 고유치좌굴해석을 수행하여 얻는 좌굴하중은 오일러하중과 일치하게 된다.

고유치 좌굴해석은 크게 두 단계로 이루어지는데, 첫 번째 단계에서 단위하중에 대한 정적해석을 수행하고 두 번째 단계에서는 그 결과를 이용한 고유치해석을 통해 좌굴계수와 좌굴모드를 구하게 된다[Swanson Analysis System Inc., 1994].

3. 유한요소모델링

3.1 해석모델의 기하학적 형상

좌굴해석에 사용된 개구부를 가지는 원형강관기둥의 형상 변수들을 Fig. 3.1에 나타내었다. 원형강관기둥의 직경(D), 두께(t), 길이(L)와 개구부의 위치(l)를 Fig. 3.1의 (a)와 같이 정의하였으며, Fig. 3.1 (d)와 같이 원형강관기둥 하단을 원점으로 하는 직교좌표계를 이용하였다.

본 연구에서는 원형과 사각형의 두 가지 형상의 개구부를 가지는 원형강관기둥에 대해 해석을 수행하였으며, Fig. 3.1(b),(c)에 각각 원형개구부와 사각형개구부에 대한 형상변수를 나타내었다. 개구부의 크기를 나타내기 위한 변수로는 개구부 열림각(opening angle)을 사용하며, 원형개구부의 열림각(θ_C)과 사각형 개구부의 열림각(θ_R)으로 구분하였다. 개구부 형상비의 변화는 사각형 개구부에 대해서만 고려하고, 이는 Fig. 3.1(c)의 원주방향길이(a_s)과 축방향길이(a_l)의 비를 변화시켜 정의한다.

본 연구에서는 다양한 크기, 위치, 형상비의 개구부를 가지는 원형강관기둥에 대해 좌굴해석을 수행함으로써 개구부의 기하학적 형상에 따른 좌굴특성을 파악한다. 또한 이러한 개구부의 기하학적 형상변화를 직경-두께비 및 세장비가 다른 원형강관기둥에 대해서도 수행하여 개구부의 기하학적 형상과 좌굴특성의 상관관계가 원형강관기둥의 형상에 따라 어떻게 달라지는지 알아보고자 한다. 이러한 연구목적을 수행하기 위한 유한요소해석에 사용된 해석모델의 기하학적 특성을 Table 3.1~3.2와 Fig. 3.2에 나타내었다.

Table 3.1~3.2에서는 원형강관기둥의 부재치수를 나타내었고, 개구부의 기하학적 형상을 변화시키는 방법을 Fig. 3.2에서 보여주고 있다.

우선 원형강관기둥의 부재치수를 살펴보면, Table 3.1과 같이 직경-두께비가 $D/t=20$ 으로 동일하고 세장비가 각각 $\lambda=125, 140, 155$ 인 해석모델 T5-S125, T5-S140, T5-S155를 선정하여 세장비의 변화를 고려하였다. 그리고, Table 3.2에서와 같이 세장비가 $\lambda=125$ 로 동일하고 직경-두께비가 $D/t=25, 33.3, 50$ 인 해석모델 T4-S125, T3-S125, T2-S125를 선정하여 직경-두께비의 변화를 주었다. 이와 같이 기하학적 형상이 다른 6가지 원형강관기둥을 선정하였고, 강재의 탄성계수는 $E=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 이고 항복응력은 $\sigma_y=2.768 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 이다.

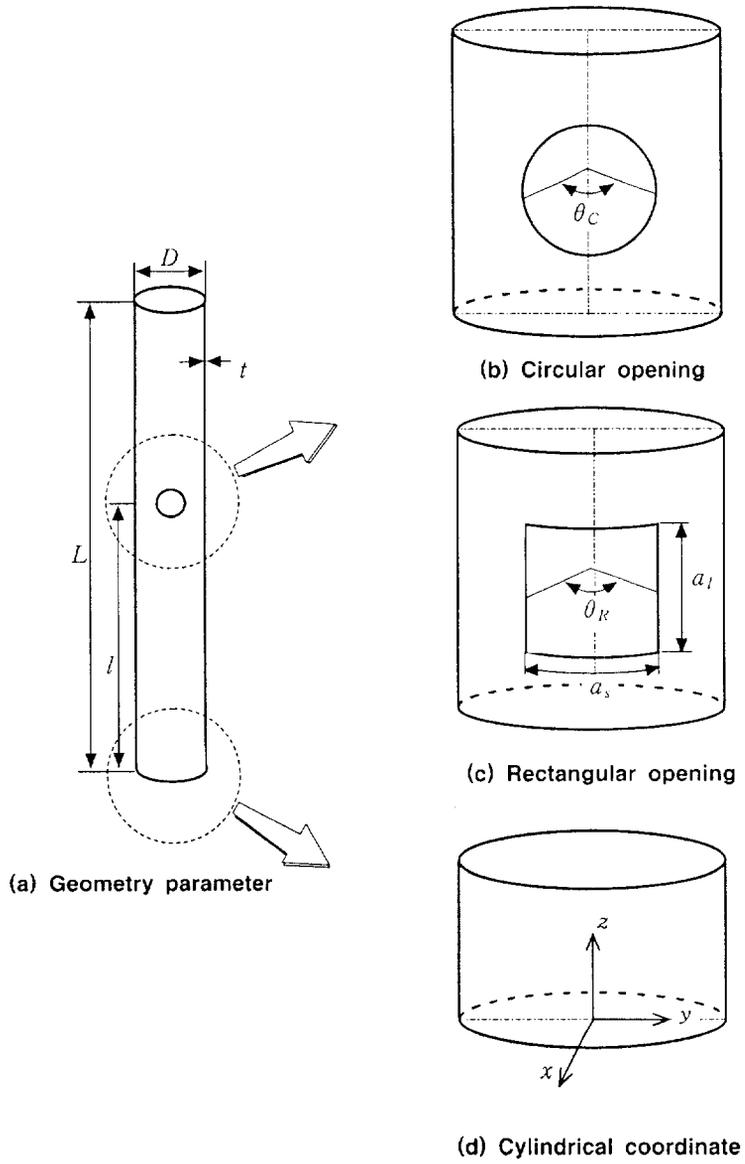


Fig. 3.1 Geometry of tubular column with opening.

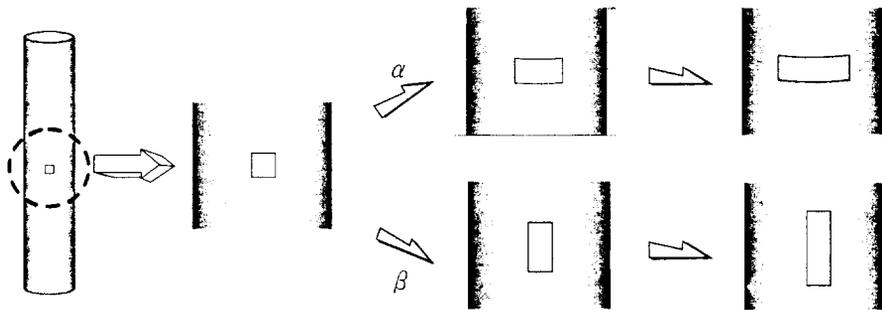
Table 3.1 Geometric properties of test model with different slenderness

Model	Diameter, D (mm)	Thickness, t (mm)	Length, L (mm)	D/t	Slenderness, λ	Euler load, P_E (ton)
T5-S125	100×5	100×5	4204.26	20	125	19.72
T5-S140	100×5	100×5	4708.77	20	140	15.73
T5-S155	100×5	100×5	5213.28	20	155	12.84

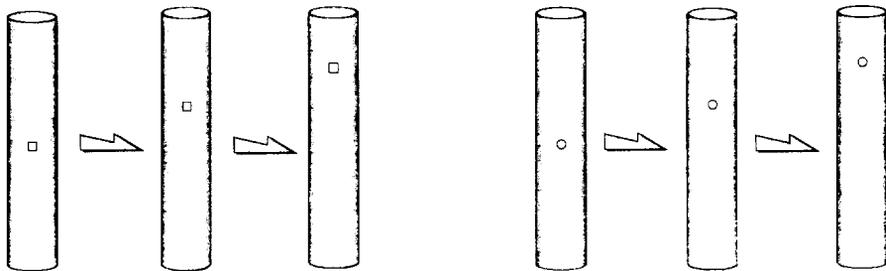
Table 3.2 Geometric properties of test model with different D/t ratio

Model	Diameter, D (mm)	Thickness, t (mm)	Length, L (mm)	D/t	Slenderness, λ	Euler load, P_E (ton)
T4-S125	100×4	100×4	4246.32	25	125	15.94
T3-S125	100×3	100×3	4288.88	33.3	125	12.08
T2-S125	100×2	100×2	4331.93	50	125	8.13

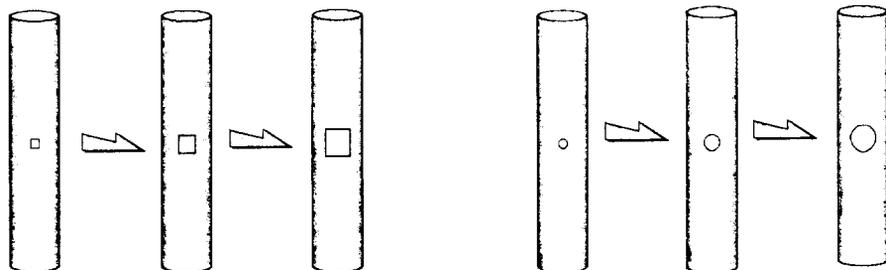
Table 3.1~3.2의 원형강관기둥이 가지는 개구부의 형상비, 위치, 열림각은 Fig. 3.2와 같이 변화한다. 형상비의 변화는 사각형 개구부에 대해서만 고려하였고, Fig. 3.2(a)에서와 같이 정사각형 개구부를 시작으로 원주방향 길이를 증가시키는 방법과 축방향 길이를 증가시키는 두 가지 방법으로 형상비를 변화시켰다. 개구부 위치의 변화는 Fig. 3.2(b)에서와 같이 사각형과 원형 개구부에 대해 고려하였고, 원형강관기둥의 중앙부에서 상단부로 이동시키면서 위치를 변화시켰다. Fig. 3.2(c)에서는 개구부 열림각의 증가를 보여주고 있으며 사각형과 원형 개구부에 대해 열림각의 증가를 고려하였다.



(a) Variation of opening aspect ratio



(b) Variation of opening location



(c) Variation of opening angle

Fig. 3.2 Geometric properties of opening under investigation.

3.2 유한요소모델

본 연구에서는 원형강관기둥의 좌굴해석을 위해 ANSYS의 3차원 쉘요소 중에서 SHELL93을 선택하였다. SHELL93은 8개의 절점을 가진 구조용 쉘요소로서, 각 절점마다 X, Y, Z축에 관한 이동과 회전의 6개의 자유도를 가진다. 이 요소는 곡선형 쉘 구조물의 해석에 특히 적합하며, 소성(plasticity), 응력경화(stress stiffening), 대처짐 (large deflection), 대변형 (large strain) 해석에 사용이 가능하다. Fig.3.3과 Fig.3.4는 각각 SHELL93의 입력값과 출력값을 나타내었다. Fig.3.2에서 I, J, K, L, M, N, O, P는 절점번호이고, 사변형요소를 삼각형요소로 사용할 경우에는 K, L, O 절점에 동일 번호를 부여하면 된다. Fig.3.3에서 SX와 SY는 요소좌표계의 X축과 Y축에 대한 요소 내 응력이며, 이러한 응력들은 쉘요소의 상하면과 중간면에서 출력된다. MX, MY, MXY는 굽힘모멘트를 나타낸다[Swanson Analysis System Inc., 1994].

개구부를 가지는 원형강관기둥의 유한요소모델링은 기하학적 형상과 경계조건, 그리고 하중조건에 대한 고려를 고려하여 전체모델의 1/2 모델을 이용하였다. 요소망 생성에 있어서는 Fig. 3.5~Fig. 3.6과 같이 개구부 주위에 대해서는 크기가 작은 삼각형 요소를 사용하여 보다 조밀하게 요소망을 생성하고, 나머지 부분은 상대적으로 큰 사각형 요소를 사용하였다.

경계조건은 양단편연결인 구속조건을 모델링을 위해 yz평면과 교차하는 상단과 하단의 4개의 절점 중, 하단의 두 절점에서는 x, y, z축 방향의 이동변위를 구속하고, 상단의 두 절점에서는 x, y축 방향의 이동변위를 구속하였다.

작용하중은 원형강관기둥 상단과 하단의 전체 절점에서 기둥의 길이방향인 z축 방향으로 압축력을 가하였다. ANSYS에서 좌굴해석을 통해 계산된 고유치는 좌굴하중계수(buckling load factor)를 나타내므로, 좌굴하중계수와 좌굴하중을 일치시키기 위해 상단과 하단의 각 절점에 대해 단위하중을 재하했고 이 하중들은 양단의 모든 절점에 걸쳐 절점하중으로 주었다.

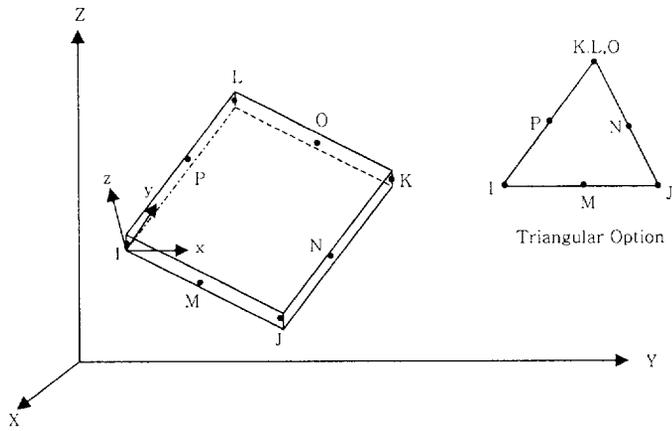


Fig. 3.3 Input of SHELL 93.

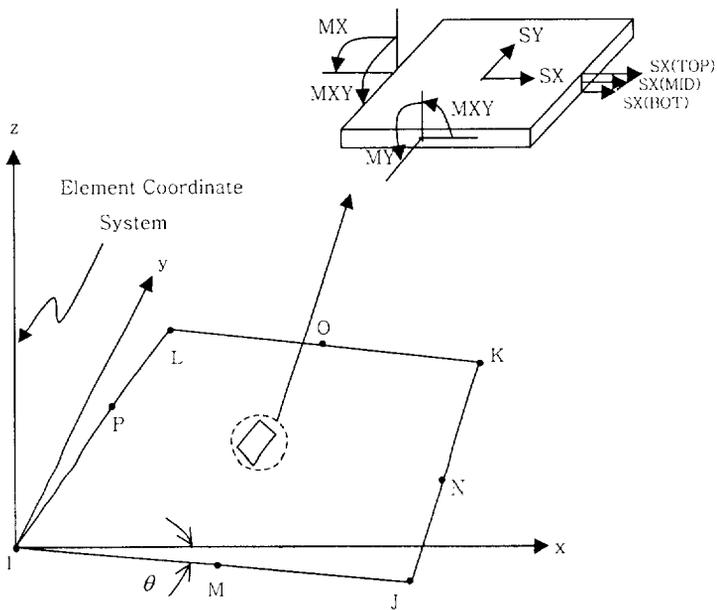


Fig. 3.4 Output of SHELL 93.

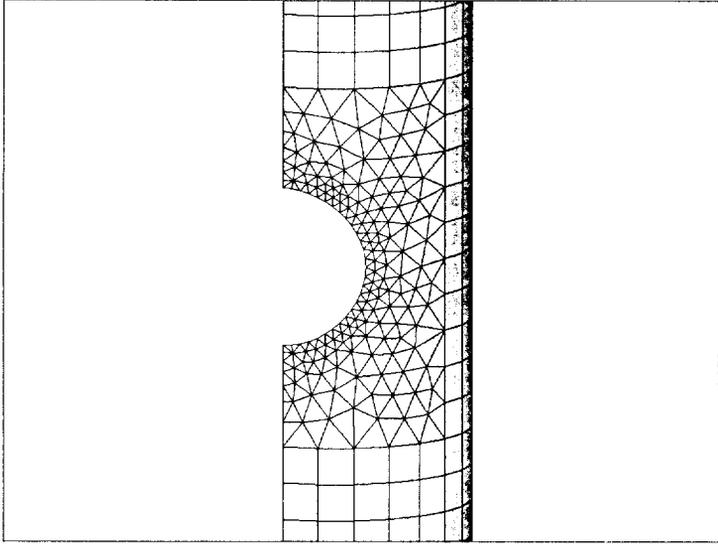


Fig.3.5 Finite element mesh around circular opening.

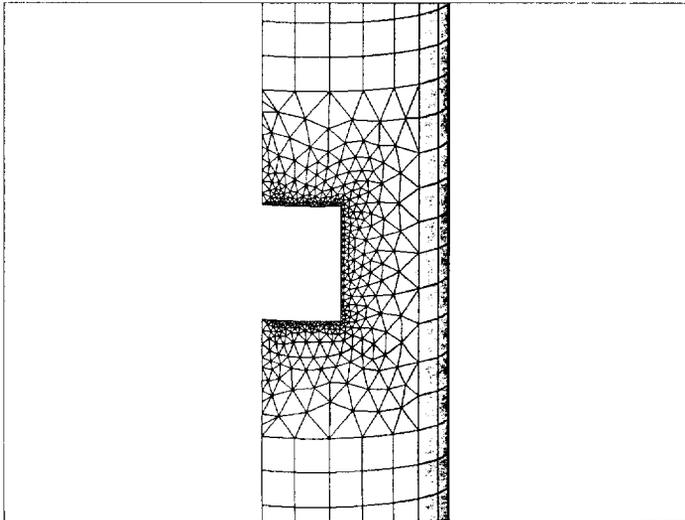


Fig.3.6 Finite element mesh around rectangular opening.

4. 수치예제

4.1 수렴성 검토

원형강관기둥의 좌굴해석을 통해 얻은 유한요소해석해의 수렴성 조사를 위해 우선 개구부가 있는 경우와 개구부가 없는 경우의 두 가지로 분류하였다.

개구부가없는 경우, 유한요소모델의 요소수를 증가시키며 좌굴해석을 수행하고 그 결과값들의 수렴성을 검토한 후 수렴값을 이론해인 Euler 하중값과의 비교하였다. 이러한 수렴성 검토의 과정을 각각 Table 3.1~3.2의 해석모델들에 대해 모두 적용하였으며, 수렴값과 이론해와의 비교결과는 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 F.E.M Solution for tubular column without opening

Solution	T5-S125	T5-S140	T5-S155	T4-S125	T3-S125	T2-S125
F.E.M Solution (ton)	19.715	15.729	12.84	15.938	12.078	8.134
Euler buckling load (ton)	19.794	15.78	12.874	16.002	12.127	8.168
Error (%)	0.4	0.32	0.26	0.4	0.44	0.42

개구부를 가지는 유한요소해석값의 수렴성 검토는 두 가지 경우에 대해 수행되었다. 먼저 개구부와 인접하지 않은 부분의 요소수를 고정시키고 개구부와 인접한 부분의 삼각형 요소수를 증가시키면서 해의 수렴성을 조사하였고, 다른 한가지는 개구부와 인접한 부분의 요소수를 고정시키고 나머지 부분의 사각형 요소수를 증가시키면서 해석을 수행하였다.

개구부와 인접한 부분의 요소수를 증가시켰을 경우 요소수가 증가함에 따라 임계좌굴하중이 감소하기는 하지만 수렴성 측면에서는 그렇다할 경향을 나타내지는 않는 반면에 개구부와 인접하지 않은 부분의 요소수를 증가시켰을 때 확실하게 임계좌굴하중이 수렴하는 것을 볼 수 있다. 실제로 개구부와 인접한 부분의 요소수를 증가시키는 데는 한계가 있고 그 영향 또한 작기 때문에 보다 정확한 해석을 위해서는 해석시간을 고려하면서 전체적으로 요소의 개수를 증가시키는 것이 수렴성 측면에서 유한요소 해석에 바람직하다. 따라서, 본 연구에서는 개구부와 인접한 부분은 적당한 개수의 삼

각형 요소를 사용하여 요소망을 형성하고, 그 이외의 부분에 대해서는 요소형상비가 1:1인 사각형 요소를 사용하여 단면을 24등분하는 요소망을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

4.2 개구부 형상비의 영향

4.2.1 세장비에 따른 개구부 형상비의 영향

개구부 형상비의 변화에 따른 좌굴특성을 조사하기 위해 Fig. 3.1(c)와 같은 사각형 개구부를 적용하고 형상비를 변화시키면서 좌굴해석을 수행하였다. 이러한 해석과정을 Table 3.1의 세장비가 다른 원형강관기둥에 대해서 수행하여 개구부 형상비와 좌굴특성의 상관관계가 기둥의 세장비에 따라 변화하는 경향을 조사하였다.

개구부 형상비의 변화를 나타내기 위해 원주방향 길이인 a_s 와 축방향 길이인 a_l 의 비로 표현되는 형상비 α 와 β 를 사용하였으며, 식(4.1)과 같다.

$$\alpha = \frac{a_l}{a_s}, \quad \beta = \frac{a_s}{a_l} = \frac{1}{\alpha} \quad (4.1)$$

형상비의 변화는 두 가지 경우를 고려하였는데, 첫 번째 경우에는 a_s 와 a_l 이 모두 2.487cm로 동일한 정사각형 개구부에서 시작하여 a_s 를 고정하고 a_l 을 0.829cm 단위로 최대 9.119 cm까지 증가시켜 α 를 증가시키고, 두 번째 경우에는 첫 번째 경우와 동일한 정사각형 개구부를 시작으로 a_l 을 고정시키고 a_s 를 0.829 cm 단위로 최대 9.119cm까지 증가시켜 β 를 증가시킨다.

해석결과는 Table 4.2~4.4와 Fig. 4.1~4.4와 같다. 여기서 $P_{cr,\alpha}$ 는 형상비 α 의 변화에 따른 원형강관기둥의 좌굴하중을, $P_{cr,\beta}$ 는 형상비 β 의 변화에 대한 좌굴하중을 나타낸다. 그리고 ϵ_α 와 ϵ_β 는 각각 α 와 β 의 변화에 따른 좌굴하중의 감소율로서 다음 식으로 정의된다.

$$\epsilon_\alpha (\%) = \frac{P_E - P_{cr,\alpha}}{P_E} \times 100, \quad \epsilon_\beta (\%) = \frac{P_E - P_{cr,\beta}}{P_E} \times 100 \quad (4.2)$$

여기서, P_E 는 개구부가 없는 원형강관기둥의 Euler하중이다.

Fig. 4.1~4.3은 개구부의 형상비에 따른 좌굴하중의 변화곡선이며 가로축은 형상비의 변화를, 세로축은 상대좌굴하중(relative buckling load)으로 나타내었다. 세로축의 상대좌굴하중은 개구부가 있는 원형강관기둥의 좌굴하중을 개구부가 없는 경우의 좌굴하중으로 나눈 값이다.

본 고찰에서는 기둥의 세장비 및 개구부의 형상비가 다른 원형강관기둥의 좌굴하중을 아래와 같은 방법으로 표시하였다.

P Slenderness, Aspect ratio

여기서, Slenderness : 원형강관기둥의 세장비

Aspect ratio : 개구부의 형상비

즉, 세장비가 125이고 형상비가 $\alpha=3$ 인 개구부를 가지는 원형강관기둥의 좌굴하중은 " $P_{\lambda 125, \alpha 3}$ "으로 표시하게 된다.

해석모델 T5-S125의 해석결과를 Table 4.2와 Fig. 4.1에 나타내었다. Fig. 4.1에서 α 와 β 의 증가에 따라 좌굴하중이 감소하는 경향은 동일하지만, α 의 증가에 따라 좌굴하중은 완만하게 감소하고 β 의 증가에 따라서는 상대적으로 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 형상비의 증가에 따른 좌굴하중은 Table 4.2와 같다. α 가 3.67로 증가했을 때 원형강관기둥의 좌굴하중은 0.282ton 감소하여 1.43%의 감소율을 나타내지만, β 가 3.67로 증가했을 경우에는 좌굴하중이 2.21ton 감소하여 11.21%의 감소율을 나타낸다.

이와 같은 형상비 증가에 따른 좌굴특성은 세장비가 다른 해석모델 T5-S140과 T5-S155에서도 동일하게 나타나는 것을 Table 4.3~4.4와 Fig. 4.2~4.3에서 알 수 있다.

Fig. 4.4는 α 와 β 의 증가에 따른 해석모델 T5-S125, T5-S140, T5-S155의 좌굴하중 변화곡선으로서, Fig. 4.1~4.3에서 상대좌굴하중을 사용하였던 것과는 달리 세로축 값으로 실제 좌굴하중을 사용하여 세장비가 다른 기둥끼리 비교가 가능하도록 하였다. 형상비가 3.67인 경우 α 와 β 에 대한 좌굴하중값의 차이가 세장비에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, $P_{\lambda 125, \alpha 3.67} - P_{\lambda 125, \beta 3.67} = 1.92\text{ton}$, $P_{\lambda 140, \alpha 3.67} - P_{\lambda 140, \beta 3.67} = 1.39\text{ton}$, $P_{\lambda 155, \alpha 3.67} - P_{\lambda 155, \beta 3.67} = 1.03\text{ton}$ 이며, 이를 통해 동일한 α 와 β 에 대한 좌굴하중의 차이가 세장비가 작은 원형강관일수록 크게 나타난다.

Table 4.2 Effect of opening aspect ratio for T5-S125 - [$P_E = 19.715 \text{ t}$]

Aspect ratio α	$P_{cr,\alpha}$ (ton)	ϵ_α (%)	Aspect ratio β	$P_{cr,\beta}$ (ton)	ϵ_β (%)
1.00	19.58	0.67	1.00	19.58	0.67
1.33	19.56	0.78	1.33	19.49	1.16
1.67	19.54	0.87	1.67	19.36	1.82
2.00	19.52	0.97	2.00	19.19	2.67
2.33	19.50	1.07	2.33	18.97	3.76
2.67	19.49	1.16	2.67	18.70	5.13
3.0	19.47	1.25	3.00	18.37	6.80
3.33	19.45	1.34	3.33	17.98	8.82
3.67	19.43	1.43	3.67	17.51	11.21

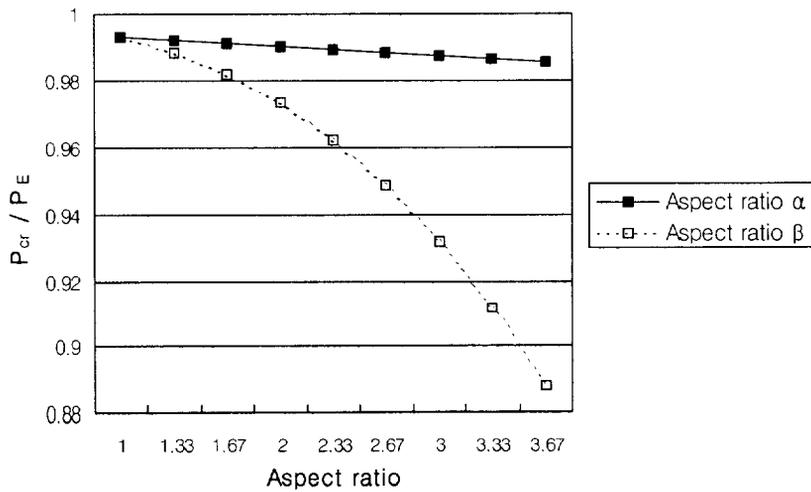


Fig. 4.1 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T5-S125.

Table 4.3 Effect of opening aspect ratio for T5-S140 - [$P_E = 15.729 \text{ t}$]

Aspect ratio α	$P_{cr,\alpha}$ (ton)	ε_α (%)	Aspect ratio β	$P_{cr,\beta}$ (ton)	ε_β (%)
1.00	15.63	0.60	1.00	15.63	0.60
1.33	15.62	0.69	1.33	15.57	1.04
1.67	15.61	0.78	1.67	15.47	1.62
2.00	15.59	0.86	2.00	15.35	2.39
2.33	15.58	0.95	2.33	15.20	3.37
2.67	15.57	1.04	2.67	15.01	4.60
3.0	15.55	1.12	3.00	14.77	6.10
3.33	15.54	1.20	3.33	14.48	7.92
3.67	15.53	1.28	3.67	14.14	10.10

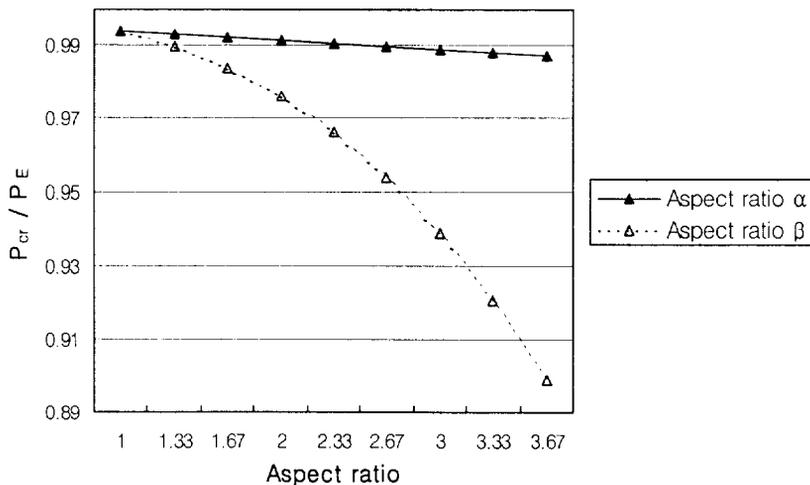


Fig. 4.2 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T5-S140.

Table 4.4 Effect of opening aspect ratio for T5-S155 - [$P_E = 12.84 \text{ t}$]

Aspect ratio α	$P_{cr,\alpha}$ (ton)	ε_α (%)	Aspect ratio β	$P_{cr,\beta}$ (ton)	ε_β (%)
1.00	12.77	0.54	1.00	12.77	0.54
1.33	12.76	0.63	1.33	12.72	0.94
1.67	12.75	0.71	1.67	12.65	1.47
2.00	12.74	0.79	2.00	12.56	2.16
2.33	12.73	0.86	2.33	12.45	3.05
2.67	12.72	0.94	2.67	12.31	4.17
3.00	12.71	1.01	3.00	12.13	5.54
3.33	12.70	1.08	3.33	11.92	7.20
3.67	12.69	1.16	3.67	11.66	9.19

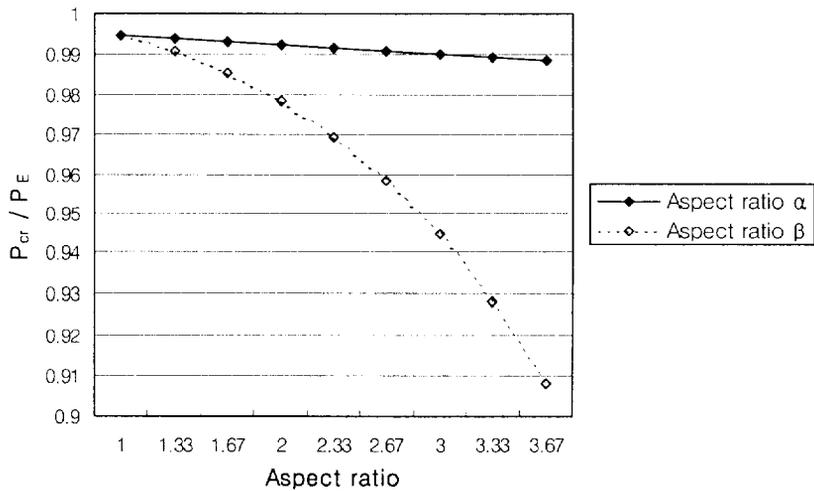


Fig. 4.3 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T5-S155.

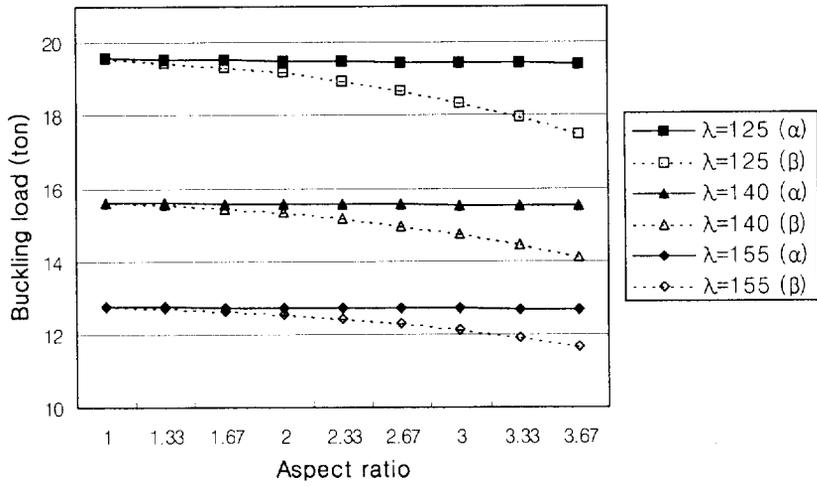


Fig. 4.4 Effect of opening aspect ratio for different slenderness.

4.2.2 직경-두께비에 따른 개구부 형상비의 영향

Table 3.2의 직경-두께비가 다른 원형강관기둥의 개구부가 4.2.1에서와 같이 변화하는 경우에 대해 좌굴해석을 수행하여 개구부 형상비와 좌굴특성의 상관관계가 기둥의 직경-두께비에 따라 변화하는 경향에 대해 알아보았다.

해석결과를 Table 4.5~4.7과 Fig. 4.5~4.8에 나타내었고, 변수와 그림의 축에 대한 정의는 4.2.1과 동일하다.

본 고찰에서는 개구부의 형상비와 직경-두께비가 다른 원형강관기둥의 좌굴하중을 아래와 같은 방법으로 표시하였다.

P D/t ratio, Aspect ratio

여기서, D/t ratio : 원형강관기둥의 직경-두께비

Aspect ratio : 개구부의 형상비

즉, 직경-두께비가 25이고 형상비가 3인 개구부를 가지는 원형강관기둥의 좌굴하중은 “ $P_{T25, \alpha 3}$ ”으로 표시하게 된다.

해석모델 T4-S125의 해석결과를 Table 4.5와 Fig. 4.5에 나타내었다. Fig. 4.5에서 알 수 있듯이 개구부 형상비 α 와 β 의 증가에 따라 좌굴하중이 감소하는 경향은 동일하지만, 형상비 α 의 증가에 따라 좌굴하중은 완만하게 감소하고 β 의 증가에 따라서는 상대적으로 급격하게 감소한다. 개구부 형상비의 증가에 따른 좌굴하중이 Table 4.5에 주어져 있다. 개구부 형상비 α 가 3.67로 증가했을 때 원형강관기둥의 좌굴하중은 0.233ton 감소하여 1.46%의 감소율을 나타내지만, 형상비 β 가 3.67로 증가했을 경우에는 좌굴하중이 1.927ton 감소하여 12.10%의 감소율을 나타낸다.

이와 같은 개구부 형상비 증가에 따른 원형강관기둥의 좌굴특성은 직경-두께비가 다른 해석모델 T3-S125와 T2-S125에 대해서도 동일하게 나타나는 것을 Table 4.6~4.7과 Fig. 4.6~4.7에서 알 수 있다.

Fig. 4.8은 개구부 형상비 α 와 β 의 증가에 따른 해석모델 T4-S125, T3-S125, T2-S125의 좌굴하중 변화곡선으로서, Fig. 4.5~4.7에서 상대좌굴하중을 사용하였던 것과는 달리 세로축값으로 실제 좌굴하중을 사용하여 직경-두께비가 다른 원형강관기둥 간의 비교가 가능하도록 하였다. 형상비가 3.67인 경우 α 와 β 에 대한 좌굴하중값의 차이가 직경-두께비에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, $P_{T25, \alpha 3.67} - P_{T25, \beta 3.67} = 1.7\text{ton}$, $P_{T33.3, \alpha 3.67} - P_{T33.3, \beta 3.67} = 1.44\text{ton}$, $P_{T50, \alpha 3.67} - P_{T50, \beta 3.67} = 1.14\text{ton}$ 이며, 이를 통해 동일한 α 와 β 에 대한 좌굴하중의 차이가 직경-두께비가 작은 원형강관일수록 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 4.5 Effect of opening aspect ratio for T4-S125 - [$P_E = 15.938 \text{ t}$]

Aspect ratio α	$P_{cr,\alpha}$ (ton)	ε_α (%)	Aspect ratio β	$P_{cr,\beta}$ (ton)	ε_β (%)
1.00	15.83	0.70	1.00	15.83	0.70
1.33	15.81	0.80	1.33	15.75	1.20
1.67	15.80	0.90	1.67	15.64	1.90
2.00	15.78	1.00	2.00	15.49	2.82
2.33	15.76	1.09	2.33	15.30	4.00
2.67	15.75	1.19	2.67	15.06	5.48
3.0	15.73	1.28	3.00	14.78	7.30
3.33	15.72	1.37	3.33	14.43	9.49
3.67	15.71	1.46	3.67	14.01	12.10

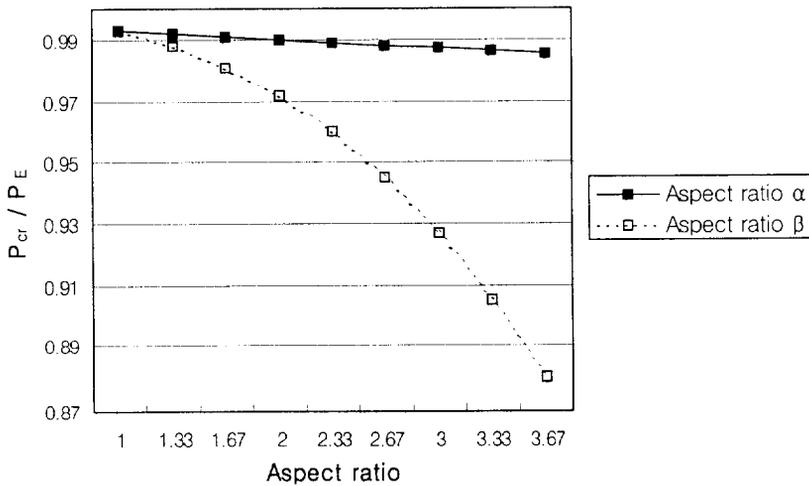


Fig. 4.5 Effect of opening aspect on relative buckling load ratio for T4-S125.

Table 4.6 Effect of opening aspect ratio for T3-S125 - [$P_E = 12.078 \text{ t}$]

Aspect ratio α	$P_{cr,\alpha}$ (ton)	ϵ_α (%)	Aspect ratio β	$P_{cr,\beta}$ (ton)	ϵ_β (%)
1.00	11.99	0.72	1.00	11.99	0.72
1.33	11.98	0.83	1.33	11.93	1.27
1.67	11.97	0.93	1.67	11.83	2.03
2.00	11.95	1.03	2.00	11.71	3.04
2.33	11.94	1.13	2.33	11.55	4.36
2.67	11.93	1.23	2.67	11.35	6.02
3.0	11.92	1.32	3.00	11.11	8.05
3.33	11.91	1.42	3.33	10.81	10.50
3.67	11.90	1.51	3.67	10.46	13.40

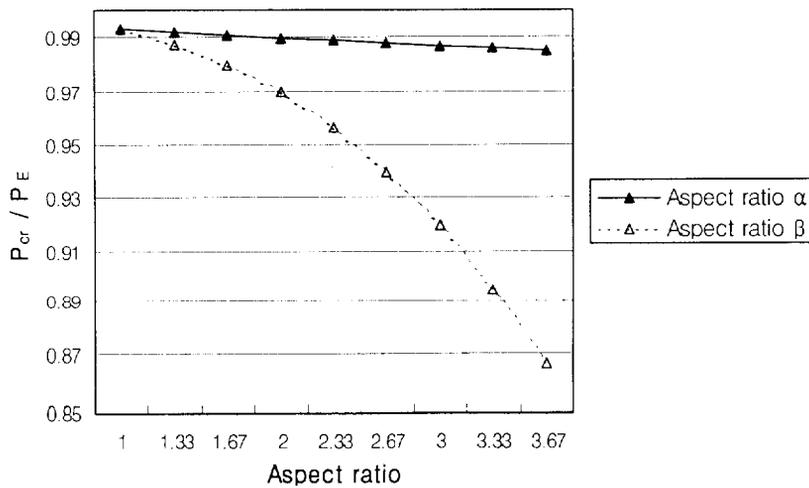


Fig. 4.6 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T3-S125.

Table 4.7 Effect of opening aspect ratio for T2-S125 - [$P_E = 8.134 \text{ t}$]

Aspect ratio α	$P_{cr,\alpha}$ (ton)	ε_α (%)	Aspect ratio β	$P_{cr,\beta}$ (ton)	ε_β (%)
1.00	8.07	0.74	1.00	8.07	0.74
1.33	8.06	0.86	1.33	8.02	1.36
1.67	8.06	0.97	1.67	7.95	2.24
2.00	8.05	1.08	2.00	7.86	3.43
2.33	8.04	1.18	2.33	7.73	4.98
2.67	8.03	1.28	2.67	7.57	6.93
3.0	8.02	1.38	3.00	7.38	9.33
3.33	8.01	1.47	3.33	7.14	12.22
3.67	8.01	1.57	3.67	6.87	15.60

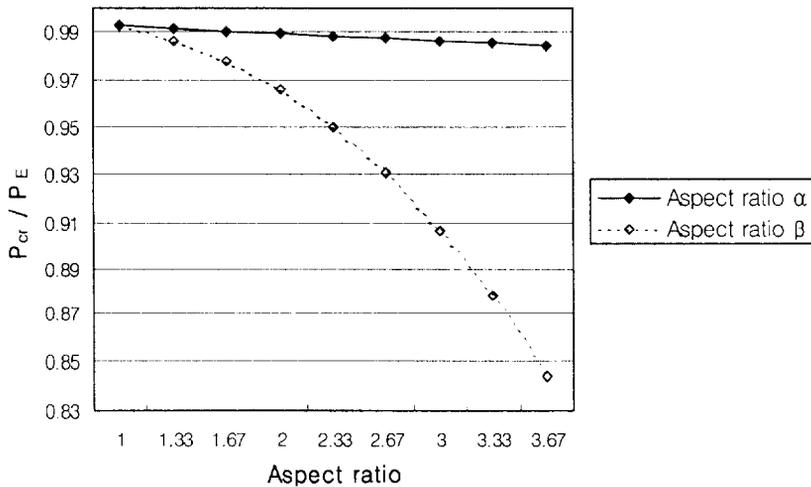


Fig. 4.7 Effect of opening aspect ratio on relative buckling load for T2-S125.

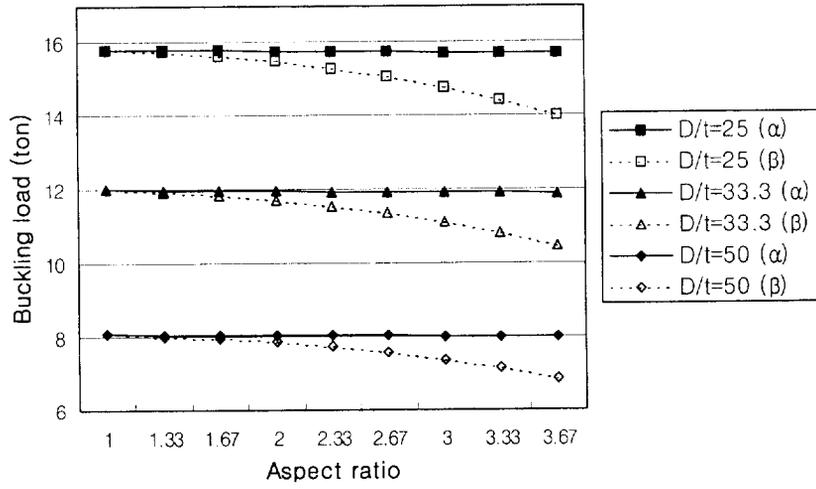


Fig. 4.8 Effect of opening aspect ratio for different D/t ratio.

4.3 개구부 위치의 영향

4.3.1 세장비에 따른 개구부 위치의 영향

개구부의 위치를 원형강관기둥의 길이방향으로 변화시키며 좌굴해석을 수행하여 개구부 위치에 따른 좌굴특성을 조사하였다. 위치의 변화는 Fig. 4.9과 같이 원형강관기둥의 중앙위치인 0.5 L에서 기둥상단방향으로 0.9 L까지 0.05 L씩 증가시켜 총 9개의 위치에 대해 좌굴해석을 수행함으로써 개구부 위치의 변화가 기둥의 좌굴특성에 미치는 영향을 조사하였다.

해석에는 원형과 사각형 개구부를 사용하였으며 두 가지 형상의 개구부에 대해 동일한 조건에서 비교하기 위해 면적을 동일하게 하였다. 원형과 사각형 개구부의 면적을 일치시키기 위해 열림각을 90°로 동일하게 한 후 사각형 개구부의 축방향 길이인 a_l 을 조절하였다. 이것은 4.2절의 해석결과에서 알 수 있듯이 좌굴하중의 변화가 개구부의 길이방향 변화보다 원주방향의 변화에 보다 더 민감하기 때문이다.

이러한 해석과정을 Table 3.1의 해석모델들에 대해 각각 적용하여 개구부의 위치와 좌굴특성의 상관관계가 기둥의 세장비에 따라 변화하는 경향을 조사하였다.

해석결과를 Table 4.8~4.10과 Fig. 4.10~4.13에 나타내었다. Table 4.8~4.10에서 $P_{cr,C}$ 와 $P_{cr,R}$ 은 각각 원형 및 사각형 개구부를 가지는 원형강관기둥의 좌굴하중이며, ϵ_C 와 ϵ_R 은 각각 원형과 사각형 개구부에 의한 좌굴하중 감소율로서 식(4.3)과 같다.

$$\epsilon_C (\%) = \frac{P_E - P_{cr,C}}{P_E} \times 100, \quad \epsilon_R (\%) = \frac{P_E - P_{cr,R}}{P_E} \times 100 \quad (4.3)$$

여기서, P_E 는 개구부가 없는 원형강관기둥의 Euler하중이다.

Fig. 4.10~4.13은 개구부 위치에 따른 좌굴하중의 변화곡선이며, 가로축은 개구부 위치의 변화를 세로축은 상대좌굴하중을 나타낸다. 상대좌굴하중은 개구부가 있는 원형강관기둥의 좌굴하중을 개구부가 없는 경우의 좌굴하중으로 나눈 값이다.

본 고찰에서는 개구부 위치 및 세장비가 다른 원형강관기둥의 좌굴하중을 아래와 같은 방법으로 표시하였다.

P Slenderness, Opening location

여기서, Slenderness : 원형강관기둥의 세장비

Opening location : 개구부의 위치

즉, 세장비가 125이고 원형 개구부의 위치가 0.5L인 원형강관기둥의 좌굴하중은 “ $P_{S125,C0.5}$ ”으로 표시하게 된다.

해석모델 T4-S125의 해석결과를 Table 4.8과 Fig. 4.10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 원형과 사각형의 두 가지 개구부 모두 기둥의 중앙부에 위치할 때 좌굴하중의 감소가 가장 크며, 상단으로 개구부의 위치가 이동할수록 좌굴하중의 감소량도 작아지는 경향을 가지고 있다. 원형 개구부의 경우 기둥의 중앙위치인 0.5L에 위치했을 때 좌굴하중은 $P_{S125,C0.5} = 18.34\text{ton}$ 이고, 0.9L에 위치하는 경우 $P_{S125,C0.9} = 19.57\text{ton}$ 으로 0.5L에 원형 개구부가 위치하는 경우 0.9L의 경우보다 좌굴하중이 6.72% 더 감소함을 알 수 있다. 사각형 개구부의 경우에도 개구부의 위치가 0.5L인 경우 0.9L일 때 보다 좌굴하중이 8.11% 더 많이 감소한다.

한편, 원형 개구부와 사각형 개구부에 의한 좌굴하중의 차이가 개구부의 위치에 따라 다르게 나타나는 것을 그림과 Table을 통해 알 수 있다. 즉, 기둥의 중앙에 원형 개구부가 있을 때의 좌굴하중과 사각형 개구부가 있을 때 좌굴하중의 차이인 “ $P_{S125,C0.5} - P_{S125,R0.5}$ ”이 0.29ton인 반면, 개구부의 위치가 0.9L인 경우 “ $P_{S125,C0.9} - P_{S125,R0.9}$ ”는 0.03ton으로 거의 동일한 것을 알 수 있다. 하지만, 0.5L에서의 차이값인 0.29ton 역시 매우 작은 값으로 원형과 사각형 개구부에 의한 좌굴하중은 크게 차이 나지 않는다.

이상과 같은 개구부 위치변화에 따른 기둥의 좌굴특성은 세장비가 다른 해석모델인 T5-S140과 T5-S155에 대해서도 동일하게 나타나는 것을 Table 4.9~4.10과 Fig. 4.11~4.12에서 알 수 있다.

Fig. 4.13은 개구부 위치의 변화에 따른 해석모델 T5-S125, T5-S140, T5-S155의 좌굴하중 변화곡선으로서, Fig. 4.10~4.12에서 상대좌굴하중을 사용하였던 것과는 달리 세로축값으로 실제 좌굴하중을 사용하여 세장비가 다른 원형강관기둥 간의 비교가 가능하도록 하였다. 세 가지 해석모델의 경우에서 모두 원형개구부를 가질 때의 좌굴하중이 사각형 개구부를 가질 때보다 더 크지만 그 차이는 매우 작은 것을 알 수 있다.

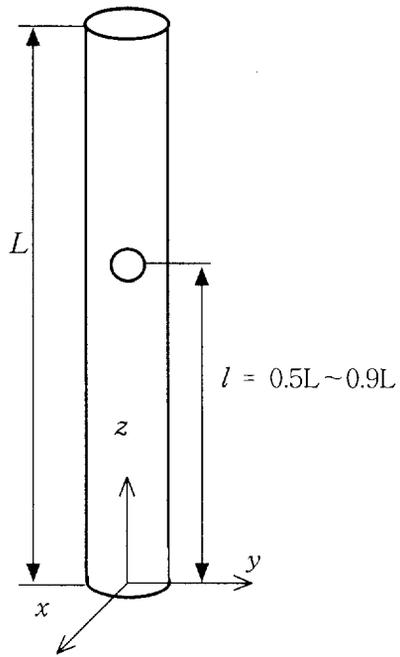


Fig. 4.9 Variation of opening location in the tubular column.

Table 4.8 Effect of opening location for T5-S125 - [$P_E = 19.175 \text{ t}$]

l (cm)		Circular opening		Rectangular opening	
		$P_{cr,C}$ (ton)	ϵ_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ϵ_R (%)
0.50 L	210.21	18.34	7.50	18.05	9.08
0.55 L	231.23	18.37	7.34	18.08	8.89
0.60 L	252.26	18.46	6.86	18.19	8.33
0.65 L	273.28	18.60	6.10	18.35	7.43
0.70 L	294.30	18.78	5.11	18.57	6.24
0.75 L	315.32	18.99	3.97	18.82	4.86
0.80 L	336.34	19.21	2.78	19.09	3.42
0.85 L	357.36	19.41	1.67	19.34	2.07
0.90 L	378.38	19.57	0.78	19.54	0.97

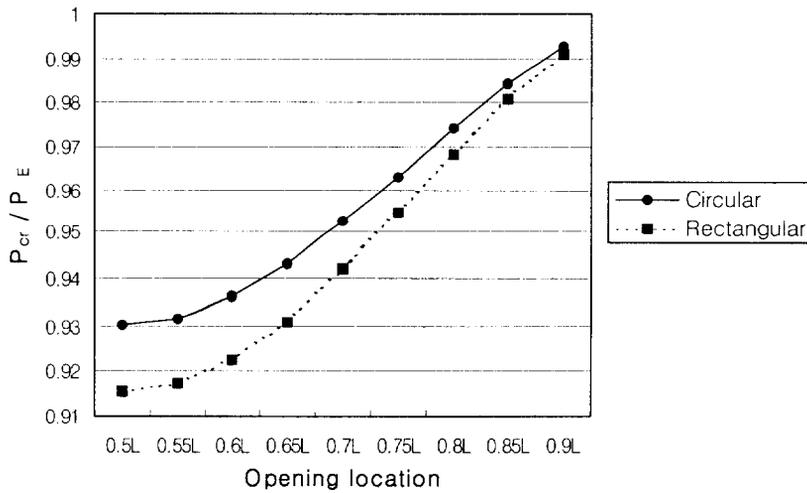


Fig. 4.10 Effect of opening location on relative buckling load for T5-S125.

Table 4.9 Effect of opening location for T5-S140 - [$P_E = 15.729 \text{ t}$]

l (cm)		Circular opening		Rectangular opening	
		$P_{cr,C}$ (ton)	ϵ_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ϵ_R (%)
0.50 L	235	14.74	6.26	14.53	7.60
0.55 L	259	14.77	6.12	14.56	7.44
0.60 L	282	14.83	5.72	14.64	6.95
0.65 L	306	14.93	5.08	14.76	6.19
0.70 L	330	15.06	4.25	14.91	5.19
0.75 L	353	15.21	3.29	15.09	4.04
0.80 L	377	15.37	2.30	15.28	2.83
0.85 L	400	15.51	1.39	15.46	1.71
0.90 L	424	15.63	0.64	15.60	0.79

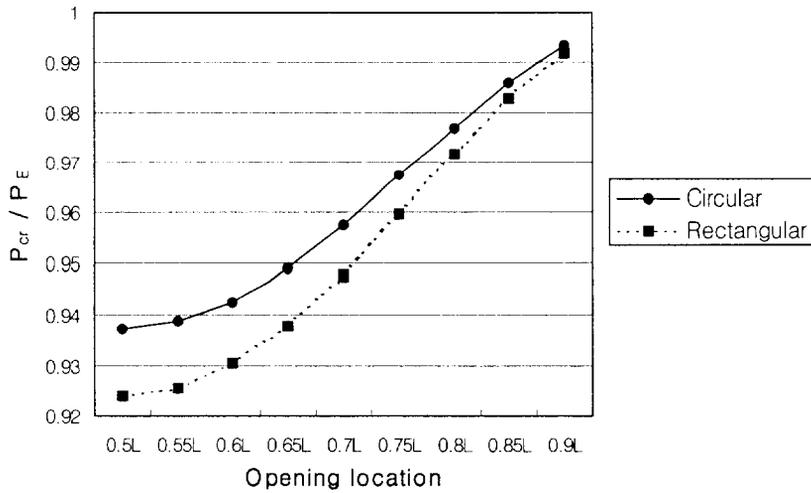


Fig. 4.11 Effect of opening location on relative buckling load for T5-S140.

Table 4.10 Effect of opening location for T5-S155 - [$P_E = 12.84 \text{ t}$]

l (cm)		Circular opening		Rectangular opening	
		$P_{cr,C}$ (ton)	ϵ_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ϵ_R (%)
0.50 L	261	12.11	5.68	11.95	6.91
0.55 L	287	12.13	5.55	11.97	6.75
0.60 L	313	12.17	5.19	12.03	6.32
0.65 L	339	12.25	4.60	12.12	5.61
0.70 L	365	12.35	3.84	12.24	4.70
0.75 L	391	12.46	2.97	12.37	3.65
0.80 L	417	12.57	2.08	12.51	2.55
0.85 L	443	12.68	1.25	12.64	1.54
0.90 L	469	12.77	0.58	12.75	0.72

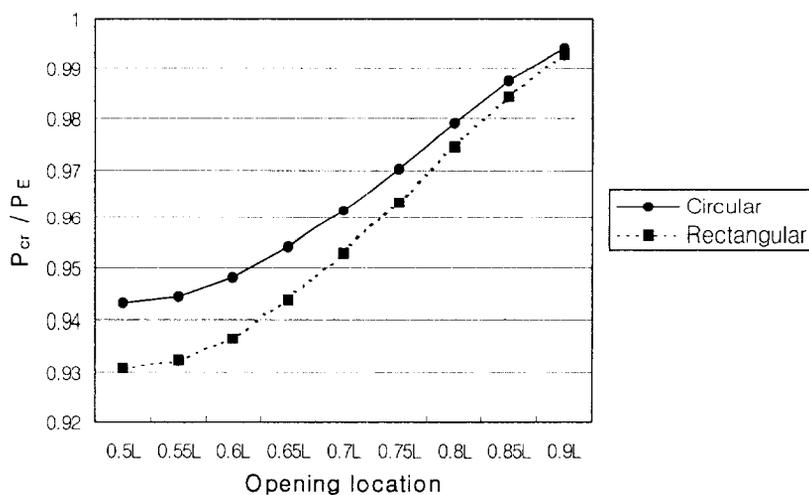


Fig. 4.12 Effect of opening location on relative buckling load for T5-S155.

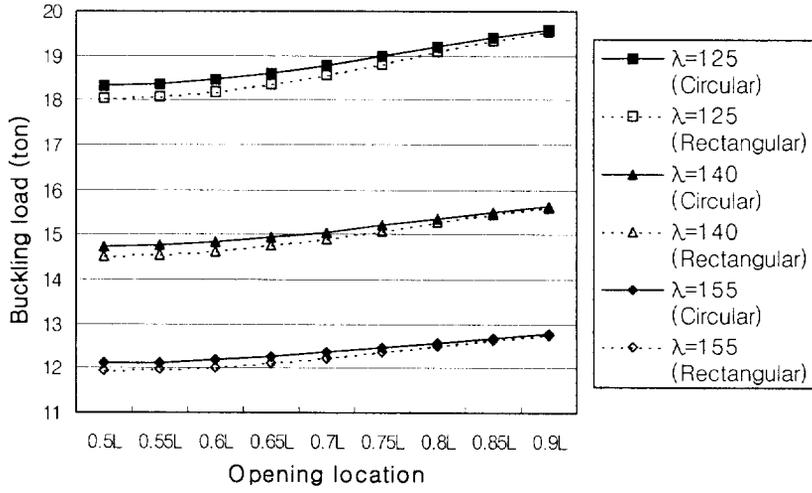


Fig. 4.13 Effect of opening location for different slenderness.

4.3.2 직경-두께비에 따른 개구부 위치의 영향

Table 3.2의 직경-두께비가 다른 원형강관기둥이 4.3.1절과 같이 다양한 위치의 개구부를 가지는 경우에 대해 좌굴해석을 수행하여 개구부 위치와 좌굴특성의 상관관계 거 기둥의 직경-두께비에 따라 변화하는 경향을 알아보았다.

해석결과를 Table 4.11~13과 Fig. 4.14~17에 나타내었고, Table 4.11~13에 사용된 변수와 그림의 축에 대한 정의는 4.2.1과 동일하다.

본 고찰에서는 직경-두께비 및 개구부의 위치가 다른 원형강관기둥의 좌굴하중을 아래와 같은 방법으로 표시하였다.

P D/t ratio, Opening location

여기서, D/t ratio : 원형강관기둥의 직경-두께비

Opening location : 개구부의 위치

즉, 직경-두께비가 50이고 사각형 개구부의 위치가 0.9L인 원형강관기둥의 좌굴하중은 " $P_{T50,R0.9}$ "으로 표시하게 된다.

해석모델 T4-S125의 해석결과를 Table 4.11과 Fig. 4.14에 나타내었다. Fig. 4.14에서 원형과 사각형의 두 가지 개구부 모두 기둥의 중앙에 위치할 때 좌굴하중의 감소가 가장 크며, 상단으로 이동할수록 좌굴하중의 감소량도 작아진다. 원형 개구부의 경우, 기둥의 중앙위치인 0.5L에 개구부가 있을 때 좌굴하중은 $P_{T25,C0.5} = 14.743\text{ton}$ 이고, 0.9L 위치에 개구부가 위치하는 경우, $P_{T25,C0.9} = 15.812\text{ton}$ 으로 0.5L에 원형개구부가 위치하는 경우, 0.9L에 개구부가 위치할 때 보다 좌굴하중이 6.71% 더 감소한다. 사각형 개구부의 경우에도 개구부의 위치가 0.5L인 경우, 0.9L일 때 보다 좌굴하중이 8.04% 더 많이 감소한다.

한편, 원형개구부와 사각형 개구부에 의한 좌굴하중 차이가 개구부 위치에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 기둥의 중앙에 원형개구부가 있을 때의 좌굴하중과 사각형 개구부가 있을 때 좌굴하중의 차이인 " $P_{T25,C0.5} - P_{T25,R0.5}$ "이 0.24ton인 반면, 개구부의 위치가 0.9L인 경우 " $P_{T25,C0.9} - P_{T25,R0.9}$ "는 0.03ton으로 거의 동일한 것을 알 수 있다. 하지만, 0.5L에서의 차이값인 0.241ton 역시 매우 작은 값으로 원형개구부와 사각형 개구부에 의한 좌굴하중은 크게 차이 나지 않는다.

이상과 같이 개구부 위치변화에 따른 원형강관기둥의 좌굴특성은 직경-두께비가 다른 해석모델인 T3-S125과 T2-S125에 대해서도 동일하게 나타나는 것을 Table 4.12~4.13과 Fig. 4.15~4.16에서 알 수 있다.

Fig. 4.17은 개구부위치의 변화에 따른 해석모델 T4-S125, T3-S125, T2-S125의 좌굴하중 변화곡선으로서, Fig. 4.14~4.16에서 상대좌굴하중을 사용하였던 것과는 달리

세로축값으로 실제 좌굴하중을 사용하여 세장비가 다른 원형강관기둥 간의 비교가 가능하도록 하였다. 세 가지 해석모델의 경우에서 모두 원형개구부를 가질 때 원형강관기둥의 좌굴하중이 사각형 개구부를 가질 때보다 더 크지만 그 차이는 매우 작다.

Table 4.11 Effect of opening location for T4-S125 - [$P_E = 15.938 \text{ t}$]

l (cm)		Circular opening		Rectangular opening	
		$P_{cr,C}$ (ton)	ε_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ε_R (%)
0.50 L	212	14.74	7.50	14.50	9.01
0.55 L	233	14.77	7.33	14.53	8.82
0.60 L	255	14.84	6.86	14.62	8.27
0.65 L	276	14.96	6.11	14.76	7.38
0.70 L	297	15.12	5.13	14.95	6.20
0.75 L	318	15.30	3.98	15.16	4.84
0.80 L	340	15.49	2.80	15.39	3.41
0.85 L	361	15.67	1.69	15.61	2.06
0.90 L	382	15.81	0.79	15.78	0.97

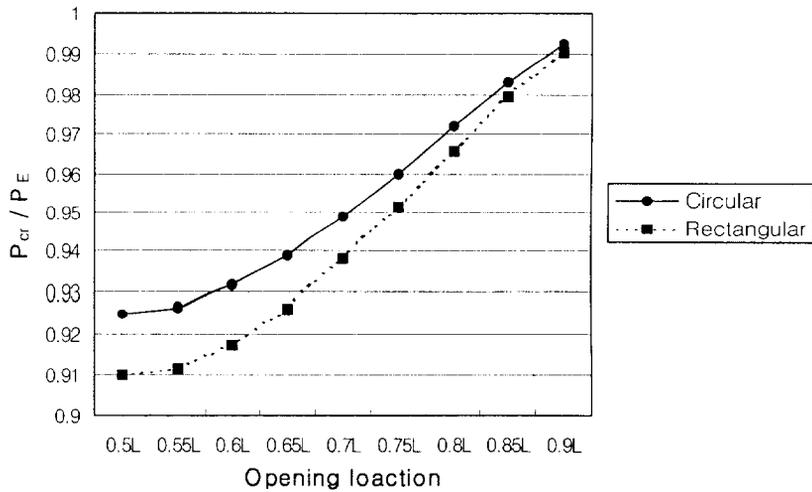


Fig. 4.14 Effect of opening location on relative buckling load for T4-S125.

Table 4.12 Effect of opening location for T3-S125 - [$P_E = 12.078 \text{ t}$]

l (cm)		Circular opening		Rectangular opening	
		$P_{cr,C}$ (ton)	ϵ_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ϵ_R (%)
0.50 L	214	11.08	8.28	10.89	9.84
0.55 L	236	11.10	8.10	10.91	9.64
0.60 L	257	11.16	7.58	10.99	9.04
0.65 L	279	11.26	6.76	11.10	8.08
0.70 L	300	11.39	5.68	11.26	6.81
0.75 L	322	11.54	4.43	11.44	5.32
0.80 L	343	11.70	3.11	11.62	3.76
0.85 L	365	11.85	1.88	11.80	2.28
0.90 L	386	11.97	0.88	11.95	1.07

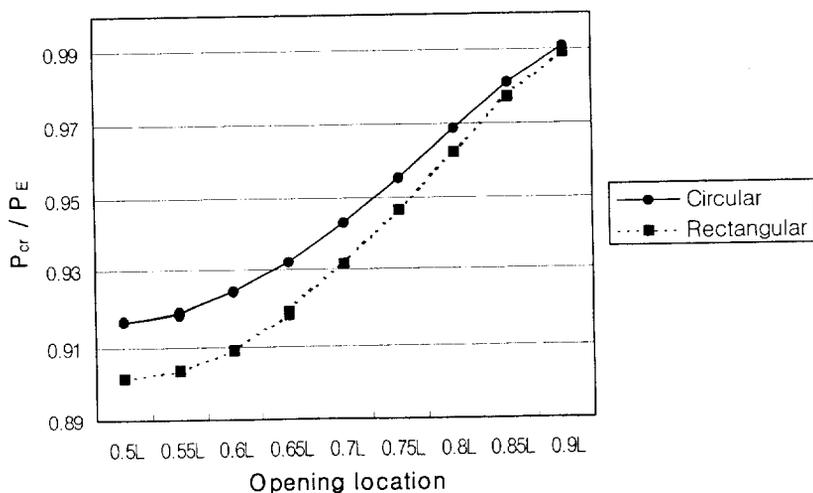


Fig. 4.15 Effect of opening location on relative buckling load for T3-S125.

Table 4.13 Effect of opening location for T2-S125 - [$P_E = 8.134 \text{ t}$]

$l \text{ (cm)}$		Circular opening		Rectangular opening	
		$P_{cr,C} \text{ (ton)}$	$\epsilon_C \text{ (\%)}$	$P_{cr,R} \text{ (ton)}$	$\epsilon_R \text{ (\%)}$
0.50 L	217	7.35	9.63	7.22	11.25
0.55 L	238	7.37	9.43	7.24	11.02
0.60 L	260	7.42	8.85	7.29	10.36
0.65 L	282	7.49	7.90	7.38	9.28
0.70 L	303	7.59	6.66	7.50	7.85
0.75 L	325	7.71	5.20	7.63	6.16
0.80 L	347	7.84	3.67	7.78	4.36
0.85 L	368	7.95	2.21	7.92	2.64
0.90 L	390	8.05	1.01	8.03	1.23

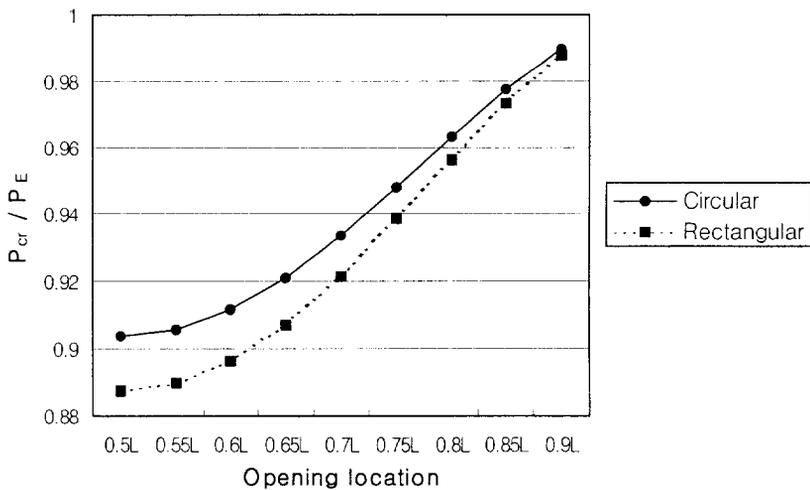


Fig. 4.16 Effect of opening location on relative buckling load for T2-S125.

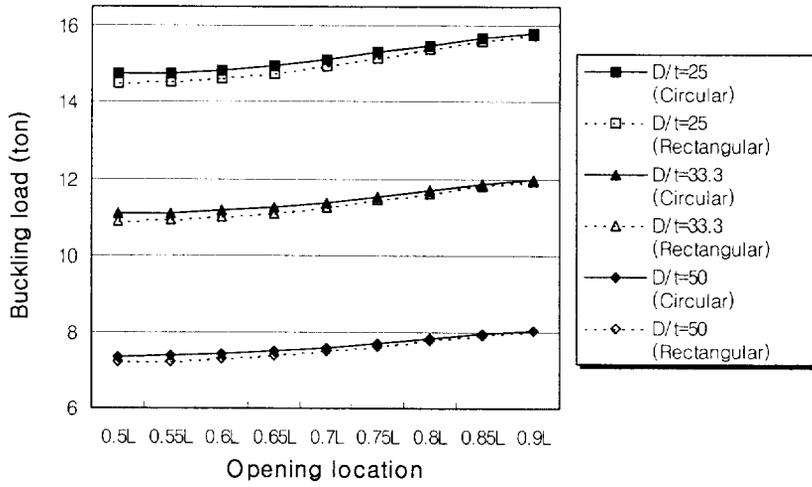


Fig. 4.17 Effect of opening location for different D/t ratio.

4.4 개구부 열림각의 영향

4.4.1 세장비에 따른 개구부 열림각의 영향

개구부 열림각의 변화가 좌굴하중에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig.3.2(c)와 같이 원형강관기둥의 열림각 크기를 증가시키며 좌굴해석을 수행하였다. 이러한 해석과정을 Table 3.1의 세장비가 다른 원형강관기둥에 대해 수행하여 개구부 열림각과 좌굴특성의 상관관계가 기둥의 세장비에 따라 변화하는 경향을 조사하였다.

각 해석모델들에 대해 면적과 열림각이 동일한 원형과 사각형의 두 가지 개구부를 적용하였으며, 개구부의 열림각을 최소 10° 에서 최대 150° 까지 20° 단위로 증가시켰다.

해석결과는 Table 4.14~4.16과 Fig. 4.18~4.21과 같다. Table 4.14~4.16에서 $P_{cr,C}$ 는 원형 개구부의 열림각 변화에 따른 원형강관기둥의 좌굴하중을, $P_{cr,R}$ 은 사각형 개구부의 열림각 변화에 따른 좌굴하중이다. 그리고 ϵ_C 와 ϵ_R 는 각각 원형과 사각형 개구부의 열림각 변화에 따른 좌굴하중의 감소율로서 다음 식으로 정의된다.

$$\epsilon_C (\%) = \frac{P_E - P_{cr,C}}{P_E} \times 100, \quad \epsilon_R (\%) = \frac{P_E - P_{cr,R}}{P_E} \times 100 \quad (4.4)$$

여기서, P_E 는 개구부가 없는 원형강관기둥의 Euler하중이다.

Fig. 4.18~4.20은 개구부의 열림각 변화에 따른 좌굴하중의 변화곡선이며, 가로축은 열림각의 변화를 세로축은 상대좌굴하중으로 나타내었다. 세로축의 상대좌굴하중은 개구부가 있는 원형강관기둥의 좌굴하중을 개구부가 없는 경우의 좌굴하중으로 나눈 값이다.

본 고찰에서는 개구부 열림각 및 세장비가 다른 원형강관기둥의 좌굴하중을 아래와 같은 방법으로 표시하였다.

P Slenderness, Opening angle

여기서, Slenderness : 원형강관기둥의 세장비

Opening angle : 개구부의 열림각

즉, 세장비가 125이고 열림각이 30° 인 원형 개구부를 가지는 원형강관기둥의 좌굴하중은 “ $P_{S125, C30}$ ”으로 표시하게 된다.

해석모델 T5-S125의 해석결과를 Table 4.14와 Fig. 4.18에 나타내었다. 해석결과에

서 원형 및 사각형 개구부를 적용한 두 가지 경우 모두 열림각이 증가함에 따라 좌굴하중이 감소한다. 원형개구부를 가지는 기둥의 좌굴하중이 사각형의 경우보다 크고 열림각이 클수록 그 차이가 커지는 것을 Fig. 4.18에서 알 수 있다. Table 4.14의 해석 결과를 살펴보면, 열림각이 10° 인 경우 두 형상에 의한 좌굴하중의 차이는 $P_{S125,C10} - P_{S125,R10} = 0$ 으로 동일하지만 150° 로 증가한 경우 $P_{S125,C150} - P_{S125,R150} = 1.15\text{ton}$ 의 차이를 보인다.

이와 같은 열림각 증가에 따른 원형강관기둥의 좌굴특성은 세장비가 다른 해석모델 T5-S140과 T5-S155에 대해서도 동일하게 나타나는 것을 Table 4.15~16과 Fig. 4.19~4.20에서 알 수 있다.

Fig. 4.21은 열림각의 증가에 따른 해석모델 T5-S125, T5-S140, T5-S155의 좌굴하중 변화곡선으로서, Fig. 4.18~4.20에서 상대좌굴하중을 사용하였던 것과는 달리 세로축값으로 실제 좌굴하중을 사용하여 세장비가 다른 원형강관기둥간의 비교가 가능하도록 하였다. 세장비가 낮은 기둥일수록 열림각의 증가에 따른 좌굴하중의 감소율이 크다. 열림각이 150° 인 원형개구부를 가지는 기둥의 좌굴하중 감소량을 살펴보면 세장비가 125일 때 4.91ton으로 24.88%의 감소율을, 세장비가 140일 때 3.57ton으로 22.67%의 감소율을, 그리고 세장비가 155인 경우 2.68ton으로 20.86%의 감소율을 나타낸다. 마찬가지로 열림각이 150° 인 사각형 개구부에 대해 좌굴하중의 감소량과 감소율을 살펴보면 세장비가 125, 140, 155일 때 감소량은 각각 6.05ton, 4.44ton, 3.35ton 이고, 감소율은 각각 30.7%, 28.21%, 26.1%이다.

Table 4.14 Effect of opening angle for T5-S125 - [$P_E = 19.715 \text{ t}$]

Opening angle (degree)	Circular opening		Rectangular opening	
	$P_{cr,C}$ (ton)	ϵ_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ϵ_R (%)
0	19.72	0	19.72	0
10	19.71	0.03	19.71	0.04
30	19.62	0.50	19.60	0.60
50	19.39	1.63	19.33	1.98
70	18.98	3.71	18.83	4.49
90	18.34	6.98	18.05	8.45
110	17.43	11.59	16.94	14.10
130	16.24	17.61	15.47	21.55
150	14.81	24.88	13.66	30.70

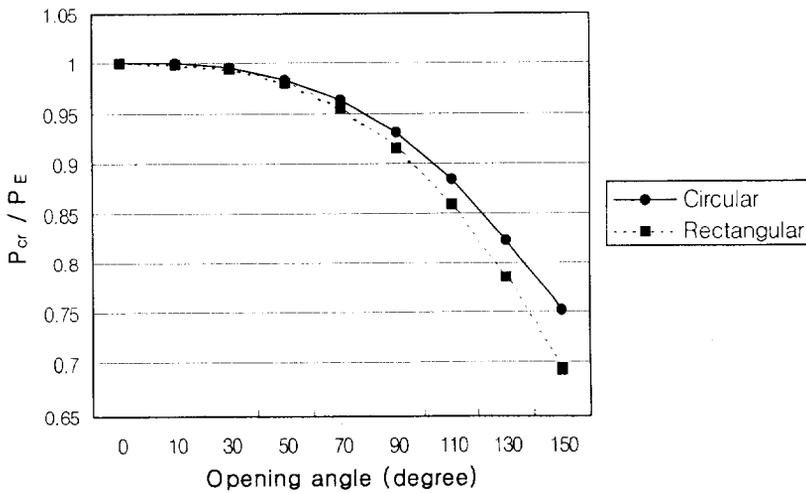


Fig. 4.18 Effect of opening angle on relative buckling load for T5-S125.

Table 4.15 Effect of opening angle for T5-S140 - [$P_E = 15.729 \text{ t}$]

Opening angle (degree)	Circular opening		Rectangular opening	
	$P_{cr,C}$ (ton)	ϵ_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ϵ_R (%)
0	15.73	0.00	15.73	0.00
10	15.73	0.02	15.72	0.03
30	15.66	0.44	15.64	0.54
50	15.50	1.46	15.45	1.77
70	15.21	3.31	15.10	4.02
90	14.74	6.26	14.53	7.60
110	14.09	10.45	13.72	12.75
130	13.22	15.94	12.64	19.61
150	12.16	22.67	11.29	28.21

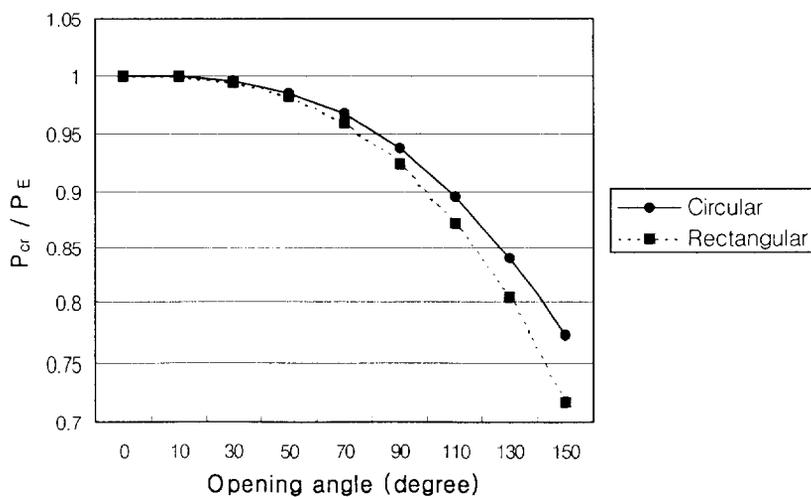


Fig. 4.19 Effect of opening angle on relative buckling load for T5-S140.

Table 4.16 Effect of opening angle for T5-S155 - [$P_E = 12.84 \text{ t}$]

Opening angle (degree)	Circular opening		Rectangular opening	
	$P_{cr,C}$ (ton)	ϵ_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ϵ_R (%)
0	12.84	0.00	12.84	0.00
10	12.84	0.02	12.84	0.03
30	12.79	0.40	12.78	0.49
50	12.67	1.32	12.63	4.60
70	12.45	3.01	12.37	3.64
90	12.11	5.68	11.95	6.91
110	11.62	9.50	11.35	11.63
130	10.97	14.57	10.53	18.00
150	10.16	20.86	9.49	26.10

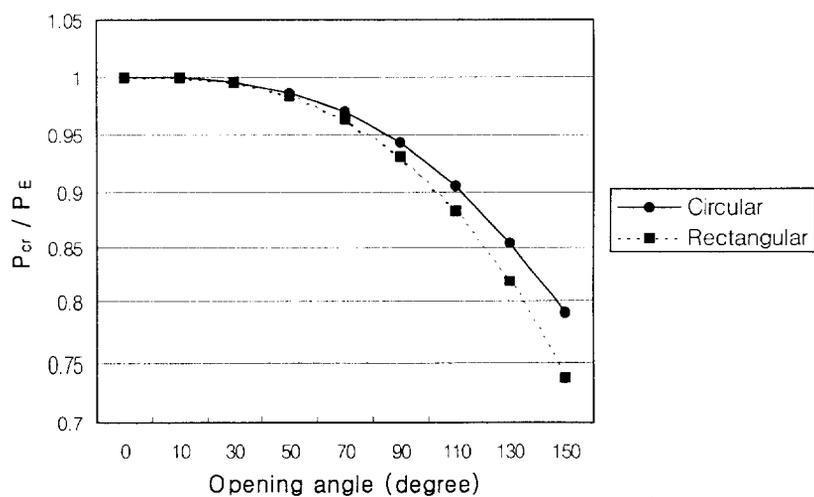


Fig. 4.20 Effect of opening angle on relative buckling load for T5-S155.

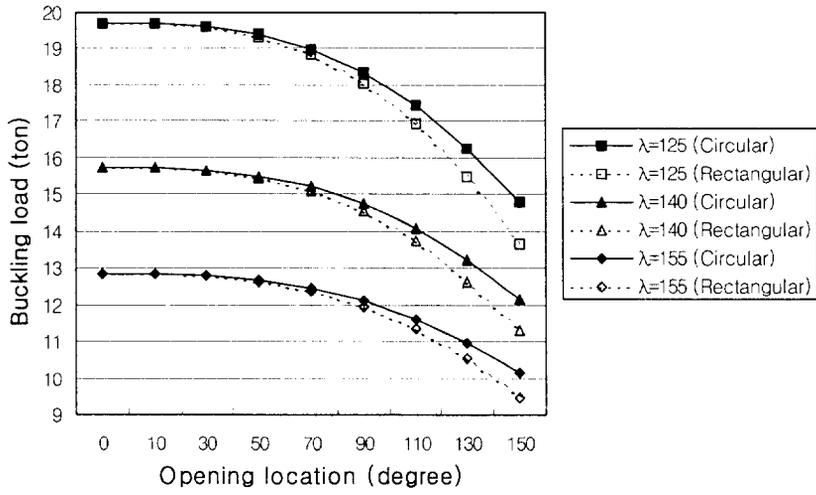


Fig. 4.21 Effect of opening angle for different slenderness.

4.4.2 직경-두께비에 따른 개구부 열림각의 영향

Table 3.2의 직경-두께비가 다른 원형강관기둥의 개구부 열림각이 4.4.1절과 같이 변화하는경우에 대해 좌굴해석을 수행하여 직경-두께비에 따라 개구부 열림각과 좌굴 특성의 상관관계가 변화하는 경향을 조사하였다.

해석결과를 Table 4.17~4.19와 Fig. 4.22~4.25에 나타내었고, 변수와 그림의 축에 대한 정의는 4.4.1과 동일하다.

본 고찰에서는 직경-두께비 및 개구부의 열림각이 다른 원형강관기둥의 좌굴하중을 아래와 같은 방법으로 표시하였다.

P D/t ratio, Opening angle

여기서, D/t ratio : 원형강관기둥의 직경-두께비

Opening angle : 개구부의 열림각

즉, 직경-두께비가 33.3이고 열림각이 70° 인 사각형 개구부를 가지는 원형강관기둥의 좌굴하중은 " $P_{T33.3, R70}$ "으로 표시하게 된다.

해석모델 T4-S125의 해석결과를 Table 4.5와 Fig. 4.5에 나타내었다. 해석결과에서 원형 및 사각형 개구부를 적용한 두 가지 경우 모두 열림각이 증가함에 따라 좌굴하중이 감소한다. 원형개구부를 가지는 기둥의 좌굴하중이 사각형의 경우보다 크고, 열림각이 클수록 그 차이가 커지는 것을 Fig. 4.22에서 알 수 있다. Table 4.17의 해석결과를 살펴보면, 열림각이 10° 인 경우 두 형상에 의한 좌굴하중의 차이는 $P_{T25, C10} - P_{T25, R10} = 0$ 으로 동일하지만 150° 로 증가한 경우 $P_{T25, C150} - P_{T25, R150} = 0.92\text{ton}$ 의 차이를 보인다.

이와 같은 열림각의 증가에 따른 기둥의 좌굴특성은 직경-두께비가 다른 해석모델 T3-S125와 T2-S125에 대해서도 동일하게 나타나는 것을 Table 4.18~19와 Fig. 4.23~4.24에서 알 수 있다.

Fig. 4.25는 열림각의 증가에 따른 해석모델 T4-S125, T3-S125, T2-S125의 좌굴하중 변화곡선으로서, Fig. 4.22~4.24에서 상대좌굴하중을 사용하였던 것과는 달리 세로 축값으로 실제 좌굴하중을 사용하여 직경-두께비가 다른 원형강관기둥간의 비교가 가능하도록 하였다. 그림에서 세장비가 작은 기둥일수록 열림각의 증가에 따른 좌굴하중의 감소율이 크다. 열림각이 150° 인 원형개구부를 가지는 기둥의 좌굴하중 감소량을 살펴보면 직경 대 두께비가 25일 때 4.26ton으로 26.75%의 감소율을, 직경 대 두께비가 33.3일 때 3.55ton으로 29.42%의 감소율을, 그리고 직경 대 두께비가 50인 경우 2.75ton으로 33.77%의 감소율을 나타낸다. 마찬가지로 열림각이 150° 인 사각형 개구부에 대해 좌굴하중의 감소량과 감소율을 살펴보면 직경 대 두께비가 25, 33.3, 50일

때 감소량은 각각 5.18ton, 4.24ton, 3.2ton이고, 감소율은 각각 32.51%, 35.09%, 39.3%이다.

Table 4.17 Effect of opening angle for T4-S125 - [$P_E = 15.938 \text{ t}$]

Opening angle (degree)	Circular opening		Rectangular opening	
	$P_{cr,C}$ (ton)	ε_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ε_R (%)
0	15.94	0.00	15.94	0
10	15.93	0.03	15.93	0.04
30	15.86	0.51	15.84	0.62
50	15.67	1.71	15.61	2.06
70	15.31	3.95	15.18	4.76
90	14.74	7.50	14.50	9.01
110	13.94	12.51	13.54	15.06
130	12.91	18.99	12.28	22.96
150	11.67	26.75	10.76	32.51

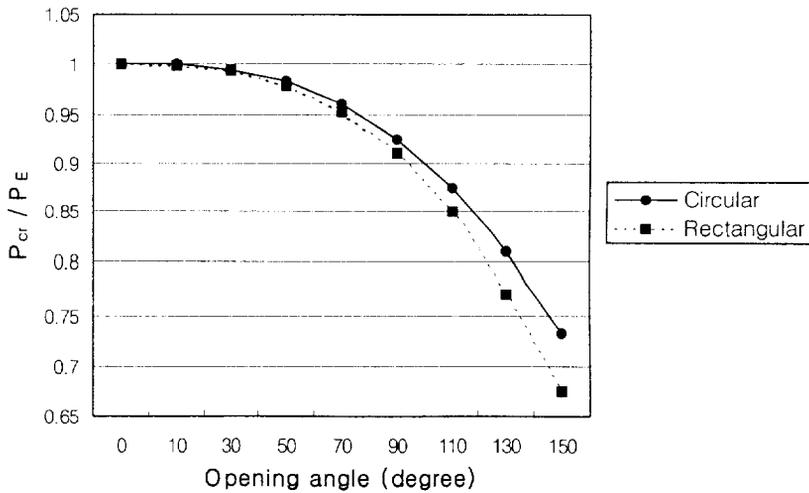


Fig. 4.22 Effect of opening angle on relative buckling load for T4-S125.

Table 4.18 Effect of opening angle for T3-S125 - [$P_E = 12.078 \text{ t}$]

Opening angle (degree)	Circular opening		Rectangular opening	
	$P_{cr,C}$ (ton)	ϵ_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ϵ_R (%)
0	12.08	0.00	12.08	0
10	12.08	0.02	12.07	0.04
30	12.01	0.53	12.00	0.65
50	11.86	1.84	11.81	2.20
70	11.56	4.31	11.46	5.15
90	11.08	8.28	10.89	9.84
110	10.41	13.84	10.09	16.46
130	9.54	20.99	9.06	24.98
150	8.52	29.42	7.84	35.09

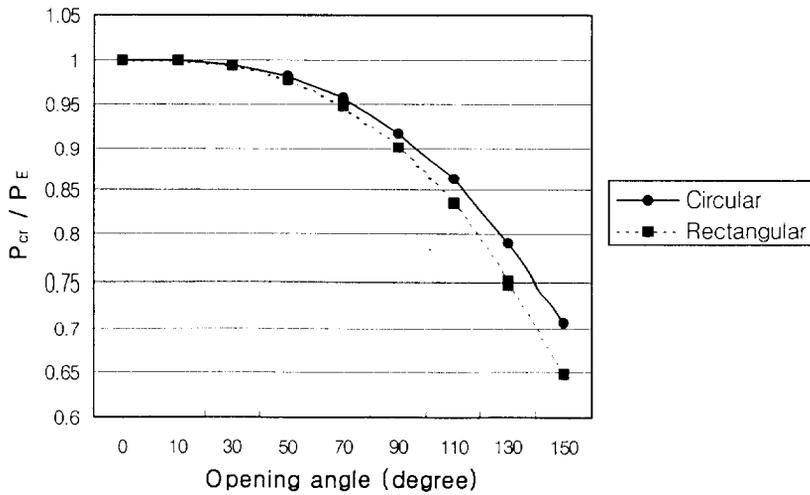


Fig. 4.23 Effect of opening angle on relative buckling load for T3-S125.

Table 4.19 Effect of opening angle for T2-S125 - [$P_E = 8.134 \text{ t}$]

Opening angle (degree)	Circular opening		Rectangular opening	
	$P_{cr,C}$ (ton)	ϵ_C (%)	$P_{cr,R}$ (ton)	ϵ_R (%)
0	8.13	0.00	8.13	0.00
10	8.13	0.01	8.13	0.02
30	8.09	0.55	8.08	0.68
50	7.97	2.04	7.94	2.43
70	7.73	4.95	7.66	5.83
90	7.35	9.63	7.22	11.25
110	6.82	16.14	6.60	18.82
130	6.15	24.35	5.83	28.36
150	5.39	33.77	4.94	39.30

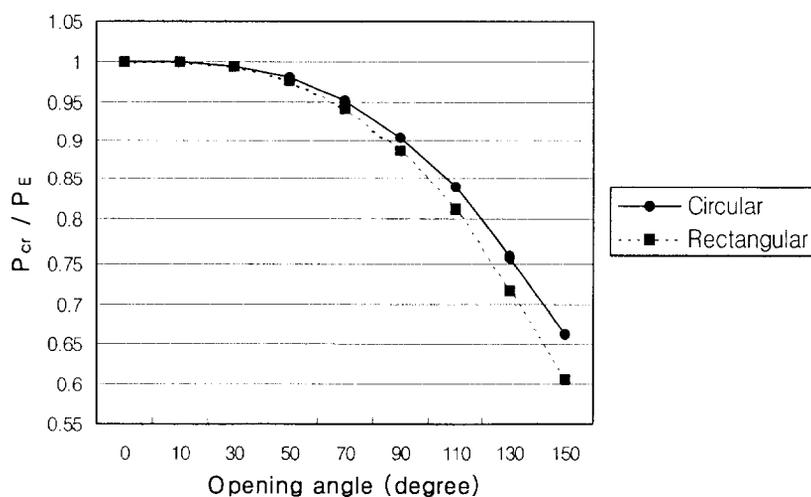


Fig. 4.24 Effect of opening angle on relative buckling load for T2-S125.

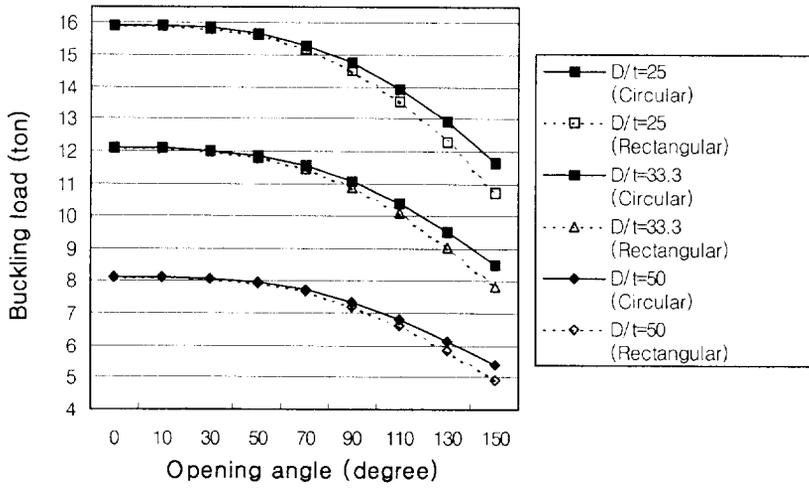


Fig. 4.25 Effect of opening angle for different D/t ratio.

5. 요약 및 결론

개구부를 가진 원형강관기둥의 좌굴특성을 파악하기 위하여, 원형 및 사각형의 개구부를 가지는 양단 핀연결 원형강관기둥이 축방향 압축력을 받을 때의 좌굴강도를 유한요소법을 이용하여 구하였다. 유한요소해석에 사용된 요소는 8절점 구조용 셸요소이며, 개구부 주위에 대해서는 삼각형 요소를 사용하여 조밀한 요소망을 구성하고 나머지 부분에 대해서는 사각형 요소를 사용하여 모델링하였다.

개구부의 기하학적 형상변화가 강관기둥의 좌굴특성에 미치는 영향을 조사하기 위해, 개구부의 위치, 열림각, 형상비를 변화시키며 좌굴해석을 수행하였다. 이러한 해석 과정을 직경-두께비 및 세장비가 다른 기둥에 대해 수행하여 개구부의 기하학적 형상과 좌굴특성의 상관관계가 기둥의 치수에 따라 변화하는 경향을 조사하였고 결론은 다음과 같다.

- 1) 형상비의 변화에 따른 좌굴하중의 감소는 해석모델 T2-S125의 경우에 가장 뚜렷하게 나타났는데, 사각형 개구부의 길이방향 치수를 증가시켜 형상비 α 가 3.67인 경우 좌굴하중의 감소량은 α 가 1일 때보다 최대 0.83%가 크게 나타났다. 반면 원주방향의 치수를 증가시켜 형상비 β 가 3.67인 경우 좌굴하중은 β 가 1일 때보다 최대 14.86% 더 많이 감소한다. 즉, 개구부의 좌굴하중 변화에는 개구부 열림각의 영향이 크다는 것이며, 이러한 경향은 두께와 세장비가 다른 원형강관기둥에 대해서도 동일하게 나타난다. 따라서, 사각형 개구부의 면적을 증가시킬 필요가 있을 때, 길이방의 치수를 증가시키는 것이 좌굴하중의 측면에서 유리하다. 한편 위와 같은 경향은 세장비와 직경-두께비가 작은 원형강관기둥일수록 뚜렷하게 나타난다.
- 2) 개구부의 위치에 따른 좌굴하중의 감소율은 해석모델 T2-S125에서 가장 크게 나타났다. 원형개구부가 기둥의 중앙인 0.5L에 위치할 때 좌굴하중은 최대 9.63% 감소하고 단부근처의 0.9L에 위치하는 경우 최대 1.01% 감소하며, 사각형 개구부의 경우 0.5L에서 최대 11.25%, 0.9L에서 1.23%가 감소한다. 이와 같이 개구부가 원형강관기둥의 중앙에 위치하는 경우 좌굴하중의 감소량이 가장 크게 나타나며 개구부의 위치가 기둥단부에 가까워지면 좌굴하중의 감소량이 점점 줄어든다. 이러한 경향은 기둥의 세장비와 직경-두께비가 작을수록 뚜렷하며, 원형 및 사각형 개구부에서 개구부 형상에 따른 좌굴하중의 차이는 크지 않다. 따라서, 좌굴하중의 측면에서 볼 때, 동일한 면적인 개구부의 경우 원형강관기둥의 중앙부에 위치하는 것이 유리하며 개구부의 형상은 큰 영향을 미치지 않는다.
- 3) 개구부 열림각의 크기가 10° 일 때 원형강관기둥의 좌굴하중 최대감소량은 원형개

구부의 경우 최대 0.03%, 사각형 개구부의 경우 최대 0.04%로 비슷하다. 하지만, 열림각의 크기를 150° 로 증가시켰을 때 원형개구부의 경우 최대 33.77%, 그리고 사각형 개구부의 경우 39.3%의 감소량을 나타낸다.

즉, 개구부의 열림각이 증가함에 따라 원형강관기둥의 좌굴하중은 일반적으로 감소하지만, 열림각이 작을 때는 개구부 형상에 따른 좌굴하중의 차이는 크지 않으며 열림각이 증가함에 따라 그 차이가 커진다.

- 4) 다양한 세장비와 직경-두께비의 원형강관기둥에서, 일반적으로 개구부의 위치와 열림각의 변화가 좌굴특성에 미치는 영향이 큰 것을 확인하였다.

참고문헌

- Ellinas C.P., Supple W.J. and Walker A.C. (1984) "Buckling of Offshore Structures", Gulf publishing company
- Reddy P., Komaraiah M., Rao P.S., Bhattacharya K. (1998) "Buckling Sensitivity Study of Thin Cylindrical Shells with Custouts Uisng FEM", Proceedings of the 14th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, pp. 95~101
- Tennyson R.C. (1968), "The Effects of Unreinforced Circular Cutouts on the Buckling of Circular Cylindrical Shells under Axial Compression", Trans. of ASME,, Journal of Engineering for Industry, Vol. 90, No. 4, pp. 541~546
- Shames I.H. and Dym C.L. (1993) "Energy and Finite Element Methods in Strucutral Mechanics", Hemisphere publishing corporation
- Swanson Analysis System Inc. (1994) "ANSYS User's Manual for Revesion 5.0, Volume I Procedures"
- Swanson Analysis System Inc. (1994) "ANSYS User's Manual for Revesion 5.0, VolumeII Commands"
- Swanson Analysis System Inc. (1994) "ANSYS User's Manual for Revesion 5.0, VolumeIII Elements"
- Yeh M.K., Lin M.C. and Wu W.T. (1999) "Bending Buckling of an Elastoplastic Cylindrical Shell with a Cutout", Engineering Structures, Vol. 21 No. 11, pp. 996~1005
- 김옥선, 김갑득, 김진호 (1995) "대형 구조물시험기를 이용한 용접각형강관기둥 압축실험에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, Vol. 15, No. 2, pp. 607~610
- 길기남 (2000) "다양한 형상의 개구부를 갖는 등방성 원통셸의 좌굴에 관한 연구", 충

남대학교 석사학위 청구논문

류연선 (1997) “재료역학”, 구미서관

박정민, 김화중 (1994) “고축압을 받는 각형 및 원형 강관 기둥의 변형능력과 좌굴강도에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, Vol. 10, No. 11, pp. 267~277

박정민, 김화중 (1994) “편심하중을 받는 원형 강관 기둥의 좌굴내력 및 변형능력에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, Vol. 11, No. 5, pp. 191~199

감사의 글

학문에 대한 꿈과 동경심을 키워주신 류연선 지도교수님의 가르침에 깊이 감사 드립니다. 지금까지도 그 깊이를 알 수 없는 사랑과 인내심으로 부족하기만 한 제자를 언제나 따뜻하게 격려해주신 스승의 은혜에 다시 한번 감사 드립니다.

바쁘신 중에도 심사를 맡아주신 윤길수 교수님, 김현태 교수님께 감사 드리며, 학문적 정신적 조언을 아끼지 않으셨던 류청로 교수님과 김정태 교수님께 감사 드립니다.

학부과정에서부터 지금까지 변함 없는 관심으로 지켜 봐주신 제주대학교 양성기 교수님과 김남형 교수님, 남정만 교수님, 이병걸 교수님께 감사 드립니다.

대학원 과정동안 대부분의 시간을 함께 하며 큰 힘이 되어준 조현만 형님과 구조최 적설계연구실의 위성광 선배님 이하 여러 선후배님들께 감사를 드립니다.

제주도에서 보낸 4년의 시간뿐만 아니라 지금까지도 삶이 풍요하고 아름다운 이유인 제주대학교 테니스 동아리 12기 동기들과 여러 선후배님들께 감사한 마음을 전하며, 어려웠던 순간을 함께 하며 힘이 되어준 김준택 형님께 감사 드립니다.

마지막으로, 철없고 못난 막내아들이 세상에서 최고라 믿으시며 모든 것을 아낌없이 주시는 아버님과 어머님께 부끄럽기만 한 이 즐거가 작은 기쁨이 되기 바라며, 사랑하는 마음을 전합니다. 어려서부터 이기적인 동생에게 모든 것을 양보해 준 마음 착한 형님께 감사 드리며, 언제나 애정어린 관심으로 보살피 주신 매형과 누님, 그리고 사랑스런 조카 태현과 승현의 건강과 행복을 기원합니다.