

슬릿형 응력제한장치 (FLD)의 좌굴 후 거동에 관한 연구

오 영 석¹⁾ · 김 철 환^{2)*} · 김 채 영³⁾ · 채 원 탁⁴⁾

¹⁾ 교수, 대전대학교, 건축공학과 ²⁾ 교수, 경북대학교, 건축토목공학부 ³⁾ 석사과정, 대전대학교, 건축공학과 ⁴⁾ 외래강사, 경북대학교, 건축도시환경공학부

A Study on the Post-buckling Behavior of Slit Type FLD(Force Limiting Device)

Oh, Young Suk¹⁾ Kim, Cheol Hwan^{2)*} Kim, Chae Yeong³⁾ Chae, Won Tak⁴⁾

¹⁾ Professor, School of Architectural Engineering, DaeJeon University, DaeJeon, 300-716, Korea

²⁾ Professor, School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

³⁾ Master's Course, School of Architectural Engineering, DaeJeon University, DaeJeon, 300-716, Korea

⁴⁾ Lecturer, School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 742-711, Korea

ABSTRACT : This research is about design of slit type FLD which secure the buckling stability of compressive brace. 4 slit type and 8 slit type specimens were experimented by pure compressive loading. Comparing the experiment results with FEA results, the good correspondence is appeared each other. Also for deriving strength-displacement formular, an unit section of slit type FLD is transferred to idealized sandwich section. This formular explains satisfactorily experiment results, in given condition. The result of this research will be used as basic data in FLD design.

KEYWORDS : slit type FLD, brace, buckling stability, compressive test of slit type FLD, design formular

1. 서 론

종래의 FLD의 개념은 세장한 철골부재에 압축력이 작용할 때, 부재에 작용하는 응력의 크기가 탄성 좌굴응력에 도달하기 전에 항복하도록 유도하는 장치이다. 국내에서는 연구한 사례를 보면, 김상대 등(2008, 2009)은 H형강 심재와 외부에 각형강관으로 보강하는 연구^{(1),(2)}를 진행하였으며, 김철환 등(2013)은 평판의 면외저항방식으로 FLD장치의 개발⁽³⁾을 진행하였다. 국외를 살펴보면 Roger Parke(1988)는 압축 부재로 이루어진 대공간 트러스에 FLD도입을 연구⁽⁴⁾하였으며, L. Schmidt 등(1979)은 부재가 좌굴하중에 도달하기 이전에 안정적인 항복을 유도하기 위해 각형강관을 2중으로 설치한 FLD장치의 개발⁽⁵⁾을 시도하였다. M. Tada(1993)는 입체 평면 트러스에 FLD가 사용된 경우를 상정하여 해석

적으로 FLD의 유효성을 입증⁽⁶⁾하였다. 이상의 연구는 압축재의 중앙부를 좌굴보강하는 방식을 상정한 연구가 대부분이다. 그러나 본 연구는 종래의 FLD와 다른 방식으로, Fig. 1과 같이 골조에 횡력이 작용할 때 압축가새의 변형을 FLD 부분에 집중시켜 압축가새의 좌굴안정성을 확보하는 슬릿형 FLD에 관한 것이다. 본 연구는 이와 같은 슬릿형 FLD의 좌굴 후 거동과 안정내력을 파악하고자 한다.

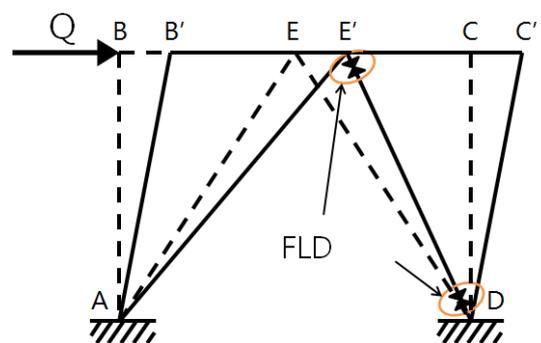


Fig. 1 Basic Concept of FLD

Note.-Discussion open until April 30, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 28, 2013; revised July 11, 2013; approved on July 30, 2013.
 © KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-4-530-1374 Fax. +82-54-530-1379
 E-mail: chk@knu.ac.kr

2. 슬릿형 FLD의 압축실험

2.1 재료인장시험

실험체 제작에 사용된 강재의 기계적 특성 및 성질을 파악하기 위하여 시험편을 제작하여 인장강도시험을 실시하였다. 3개의 인장시험편을 한국공업규격의 금속재료 인장시험편(KS B 0801)에 따라 제작하였으며, KS B 0802에서 규정하는 실험방법에 준하여 실험을 진행하였다. 3개의 시험편 중 하나는 편차가 커서 제외된 값을 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 강재는 SPP400이며 각 시험편의 두께는 2.9mm, 폭은 27mm이고 단면적은 78.3mm²이다.

Table 1. Material properties obtained from tensile coupon tests

Name	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield Ratio	El (%)
T-1	371.9	433.2	0.858	43.23
T-2	371.2	432.2	0.859	43.66
Average	371.6	432.7	0.859	43.45

2.2 압축실험

2.2.1 실험체 계획

실험체는 SPP400강관을 이용하여 높이는 300mm이고 지름과 두께는 42.7mm×2.9mm로 전 실험체에서 일정하게 하였다. 슬릿의 개수와 길이를 변수로 하였으며, 슬릿의 개수

Table 2. Specimen plan of FLD member

No.	Name	L (mm)	Shape
1	S4-25	25	
2	S4-50	50	
3	S4-75	75	
4	S4-100	100	
5	S8-25	25	
6	S8-50	50	
7	S8-75	75	
8	S8-100	100	
*Refer			b : width of slit n : number of slit L : length of slit

를 변화시키기에 따른 총 단면적의 변화를 줄이기 위해 슬릿의 개수(n)와 폭(b)을 슬릿개수가 4일 때, 슬릿 폭은 4mm로 하고, 슬릿개수가 8일 때, 슬릿 폭은 2mm로 하여 실험체를 제작하였다. 실험체 명은 슬릿수가 4개인 실험체를 S4 타입이라 하고 8개인 실험체를 S8 타입이라고 하였으며 뒤에 따르는 숫자는 슬릿의 길이(mm)를 의미한다. 실험체계획은 Table 2와 같다.

2.2.2 설치 및 측정방법

실험에 사용된 만능재료시험기(UTM)의 용량은 600kN이며, 단순압축하중과 축방향 변위의 정확한 실험결과 값을 얻기 위해 로드셀과 변위계(LVTD)를 이용하였다. 정밀한 실험체의 변형률을 얻기 위해 실험체 중앙부에 슬릿과 용접부를 피해 축방향으로 4개의 스트레인이게이지를 부착하였다.

각 실험체 마다 변위제어속도와 총 변위를 일정하게 하였다. 변위속도는 1초당 0.5mm씩 하강 하였으며, 총 변위는 약 6.4mm이다. Fig. 2는 실험체를 설치한 모습이다.



Fig. 2 Specimen installation status

2.3 실험결과 및 분석

각 실험체별 실험결과를 축방향 하중-변위 관계로 나타내면 Fig. 3, Fig. 4와 같다. Fig. 3은 슬릿의 길이를 변수로 하여 정리한 축방향 하중-변위 곡선이며 Fig. 4는 슬릿의 개수를 변수로 하여 정리한 축방향 하중-변위 곡선이다.

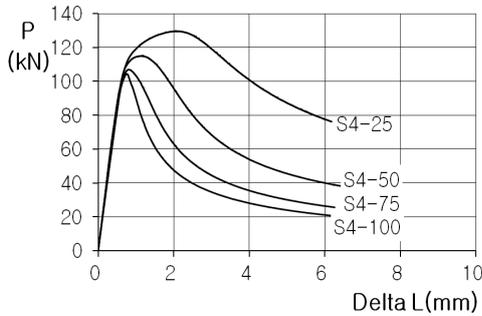
Fig. 3에 (a)를 살펴보면 슬릿 길이가 길어질수록 내력은 감소한다는 것을 알 수 있다. 실험체별로 슬릿길이는 25mm씩 일정하게 증가하지만 내력이 감소하는 비율은 점차 줄어들어 S4-75와 S4-100은 거의 비슷한 곡선을 나타냈다. 또한 슬릿길이가 길어질수록 내력의 저하는 더욱 급격해졌다. 하강곡선은 좌굴발생 직후 내력의 저하는 급격하게 나타나지만, 축방향 변위가 증가할수록 하강곡선은 완만해져서 안정적

인 거동을 나타낸다. Fig. 3에 (b)를 살펴보면 슬릿 길이가 길어질수록 내력은 감소하였으며, S4 타입과는 다르게 슬릿 길이가 25mm씩 길어질수록 내력의 거의 일정하게 감소하였다. 하강곡선의 경향은 S4 타입과 유사함을 알 수 있다. Fig. 4를 살펴보면 내력의 경우 S4 타입이 S8 타입보다 더

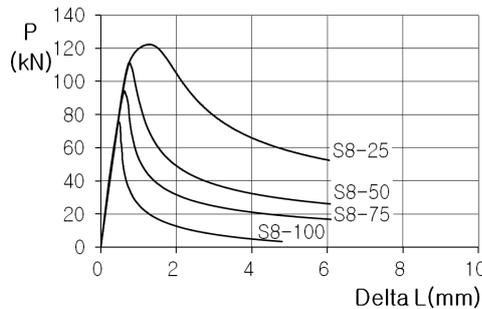
크며, 하강곡선의 경우 S4 타입이 S8 타입보다 더욱 완만함을 알 수 있다. 내력의 차이는 슬릿길이가 100mm인 경우를 제외하고는 거의 비슷하게 나타났다.

각 실험체 별 파괴모드는 Fig. 5에 나타난 바와 같이, 강관의 외부로 휘는 좌굴변형을 나타내었다.

압축실험의 결과 슬릿 길이가 길어질수록 내력이 감소하고 슬릿 개수가 증가할수록 내력이 감소하였다. 실험체별 최대내력(P_{max}) 및 최대내력시 축방향 변위(ΔL_{max})를 Table 3에 나타내었다. 슬릿개수가 증가할수록 최대내력은 감소하며, 슬릿길이가 길어질수록 최대내력은 감소하는 것을 알 수 있다.

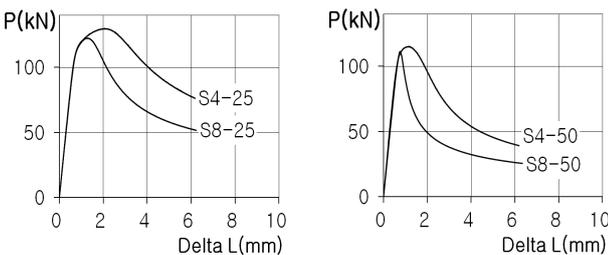


(a) S4 type



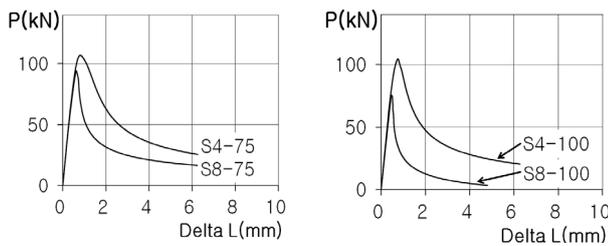
(b) S8 type

Fig. 3 Axial load - longitudinal displacement curves of specimen (1)



(a) L=25

(b) L=50



(c) L=75

(d) L=100

Fig. 4 Axial load - longitudinal displacement curves of specimen (2)



(a) S4 Type (From Left L=25, L=50, L=75, L=100)



(b) S8 Type (From Left L=25, L=50, L=75, L=100)

Fig. 5 Failure modes of specimen

Table 3. Results of test

Name	P_{max} (kN)	ΔL_{max} (mm)
S4-25	129.88	2.05
S4-50	115.25	1.16
S4-75	106.99	0.81
S4-100	104.41	0.76
S8-25	122.47	1.30
S8-50	111.35	0.76
S8-75	94.24	0.64
S8-100	75.29	0.46

3. 유한요소해석

3.1 해석개요

유한요소 프로그램을 이용한 해석결과와 실험결과를 비교해 유한요소프로그램의 타당성을 파악하였다. 그 후 실험에서 얻기 어려운 각부 응력상태, 변형상태, 거동 등을 파악하였다. 본 연구에서는 비선형 해석 및 소성좌굴해석이 가능한 ANSYS 13.0을 사용하였다.

3.2 유한요소 모델링

3.2.1 요소 상정 및 응력-변형률 관계

입체구조의 3-D모델링에 주로 사용되는 Solid 185를 사용하였다. Solid 185와 Solid 186은 역학적으로는 유사하지만 기하학적으로는 차이가 있다. Fig. 6(a)에 나타난 Solid 185는 한 요소 당 8개의 점이 존재하지만, Fig. 6(b)에 나타난 Solid 186은 한 요소 당 20개의 점이 존재한다. Solid186은 Solid185보다 더 정확한 해석이 가능하지만 해석시간 역시 증가하게 된다. 본 논문에서 해석한 슬릿형 FLD는 기하학적으로 단순하며 규모도 작으므로, 해석시간과 정확도를 고려하여 Solid 185를 사용하였다.

응력-변형률 관계는 재료실험에서 나온 결과 값을 사용하였으나 해석결과와 실험결과가 큰 오차를 보였다. 이는 판을 제작 시 생기는 잔류응력의 영향과 판을 강관형태로 말 때

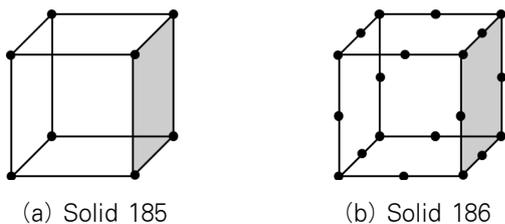


Fig. 6 Element shape

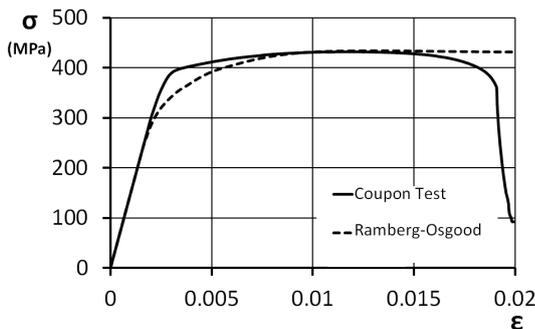


Fig. 7 Stress-strain curves

생기는 응력의 영향, 그리고 말린 판을 용접 시 응력의 영향 등을 고려하지 않음으로 여겨진다. 이와 같은 응력의 영향을 고려하기 위해 Ramberg-Osgood의 응력-변형률 관계식⁽⁷⁾을 이용하였다. 이는 항복점에 가까운 응력과 변형률의 비선형 관계를 정식화한 것으로 식 (1)로 표현되어 진다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

여기서 ϵ = 변형률, E = 탄성계수, σ = 응력, σ_0 = 항복응력도 이고 n 는 재료에 의해 고려되는 상수로 자연수이다. 일반적으로 n 은 5 거나 더 큰 값을 이용하지만, 본 연구에서는 응력-변형률의 비선형 관계 묘사뿐만 아니라 잔류응력이 존재한다는 점을 고려하여 n 을 10으로 정하였다.

Fig. 7에 인장실험치와 실제 사용한 값을 나타내었다. 점선의 경우 소재의 최대 인장강도 까지는 (1)식으로 조정하였으며 그 이후에는 변형이 지속되는 것으로 보았다. 해석에서는 점선을 재료의 응력-변형률 곡선으로 사용했다.

3.2.2 모델링 및 해석방법

ANSYS APDL을 이용해 슬릿형 FLD를 모델링한 후 요소의 크기를 0.5mm로 하였다. 경계조건의 경우 하단은 모든 방향의 이동자유도가 구속되었고 상단은 길이방향(y) 자유도를 제외한 모든 이동자유도가 구속되었다. 그리고 상단의 y방향 변위를 한 점에 집중시켰다.

본 해석에서는 소성좌굴해석을 하였는데 소성좌굴해석방법은 다음과 같이 정리된다(Fig. 8 참조).

Step1. 상단의 y방향 변위를 한 점에 집중시킨 후 단위하중을 가하여 정적해석 한다.

Step2. 앞의 해석 한 것을 좌굴 해석 후 나온 좌굴 형태를 이용해 초기좌굴을 준다.

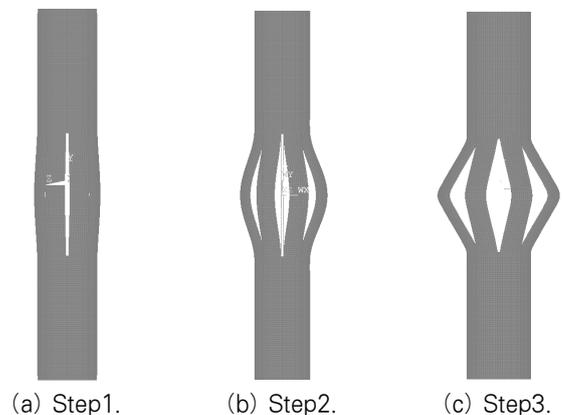


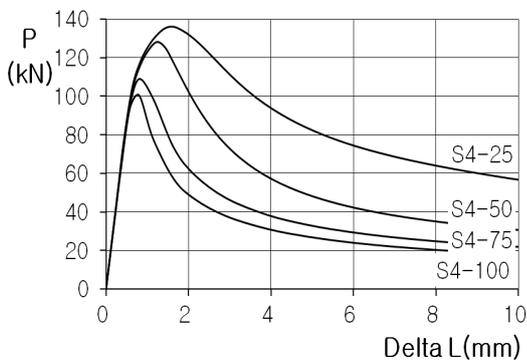
Fig. 8 Analysis procedures

Step3. 상단에 축 방향 변위를 주어 소성해석을 한다. 다만, 축 방향 변위는 -10mm로 통일한다.

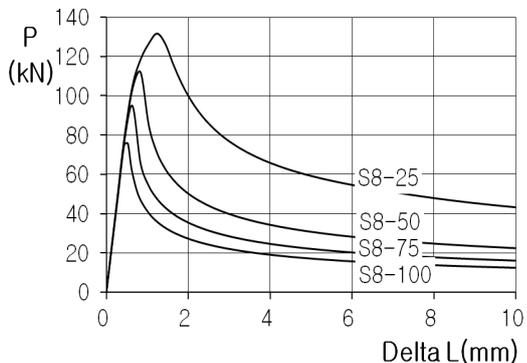
3.3 해석결과 및 분석

3.3.1 하중-변위관계 및 파괴모드

전체 타입별 해석결과를 축방향 하중-변위 관계로 나타내면 Fig. 9와 같다. 이를 통해 실험과 마찬가지로 슬릿길이와 슬릿개수가 증가할수록 최대하중과 내력은 감소한 다는 것을 알 수 있다. 타입별로 슬릿길이는 25mm씩 일정하게 증가하지만 내력이 감소하는 비율은 점차 줄어들어 S4-75와 S4-100은 거의 비슷한 곡선을 보인다. 실험에서는 이 현상이 S4 타입에서만 발생하였지만 해석에서는 S4 타입과 S8 타입 모두에게서 나타났다. 또한 하강곡선을 살펴보면 좌굴 발생 직후 내력저하는 급격하게 나타나지만 축방향 변위가 증가할수록 기울기는 완만해져서 안정적인 거동을 보인다. 해석결과는 실험결과에 비해 두 타입의 경향이 매우 유사하였다. Fig. 10에서 전체 타입의 파괴모드를 확인할 수 있다. 파괴모드를 살펴보면 강관의 외부로 향해 좌굴변형 함을 알 수 있으며 이는 실험의 파괴모드와 같다. 슬릿 낸 부분의 양 끝단의 변형을 살펴보면 S4 타입이 S8 타입보다 더 크게 나타남을 볼 수 있다.



(a) S4 Type



(b) S8 Type

Fig. 9 Axial load - longitudinal displacement curves from ANSYS

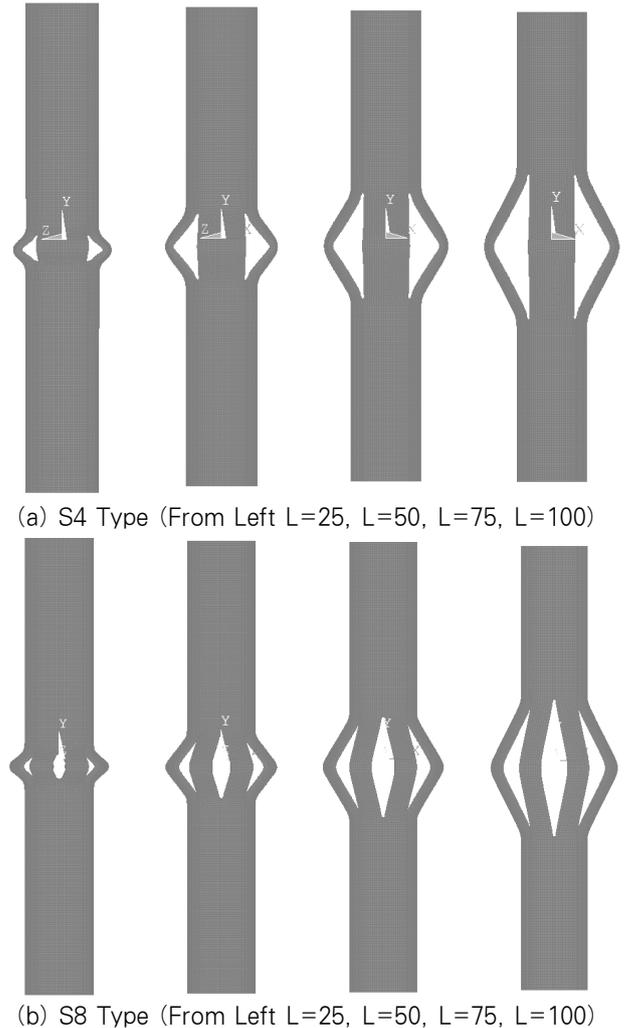
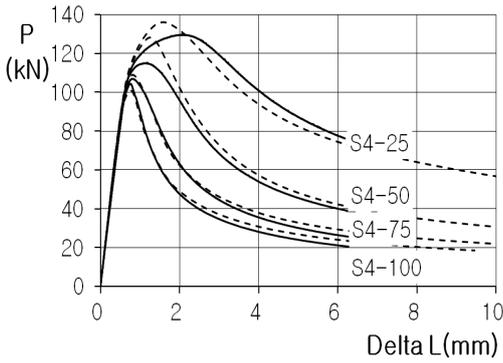


Fig. 10 Failure modes from ANSYS

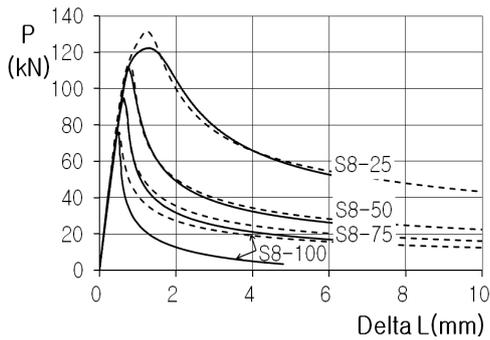
3.3.2 해석결과와 실험결과 비교

본 항에서는 실험과 해석을 비교 분석하여 해석의 유효성 및 타당성을 검증하고자 한다. Fig. 11에 실험체의 축방향 하중-변위 관계는 실선으로 나타내었으며 해석모델의 축방향 하중-변위 관계는 점선으로 나타내었다. 실험치와 해석치를 비교해 보면 전체적으로 해석치가 실험치보다 높게 나왔음을 알 수 있다. 이는 실험은 제작과정이나 실험 과정 중 많은 변수가 있기 때문으로 여겨진다. S8-100은 해석치와 실험치가 차이가 나타났는데 그 이유는 실험 시 생긴 오류도 있지만 S8-100이 다른 실험체에 비해 기하학적으로 불리한 점도 어느 정도 영향을 미쳤을 것이라 여겨진다. S8-100을 제외한 모든 타입을 살펴보면 전체적으로 비교적 잘 일치하였다.

전체 타입에 대한 실험과 해석의 파괴모드 역시 잘 일치한다는 것을 Fig. 10과 2장의 Fig. 5를 비교함으로써 알 수 있다. 위 사실을 통하여 슬릿형 FLD의 거동을 해석적으로 예측하는 것은 타당성이 있다고 사료되어진다.



(a) S4 Type



(b) S8 Type

Fig. 11 Comparison test and ANSYS

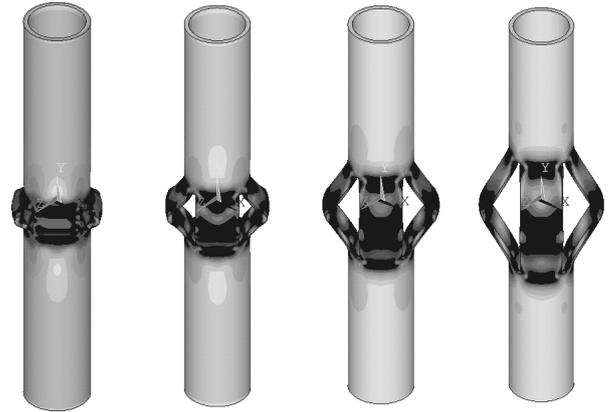
3.3.3 응력분포

지금까지 연구결과 해석결과와 실험결과는 매우 유사하다는 것을 앞에서 보여주었다. 이로써 해석의 타당성 및 유효성은 충분히 검증되었다. 각 타입별로 von Mises 응력분포를 통해서 힘의 흐름 및 집중현상을 살펴본다.

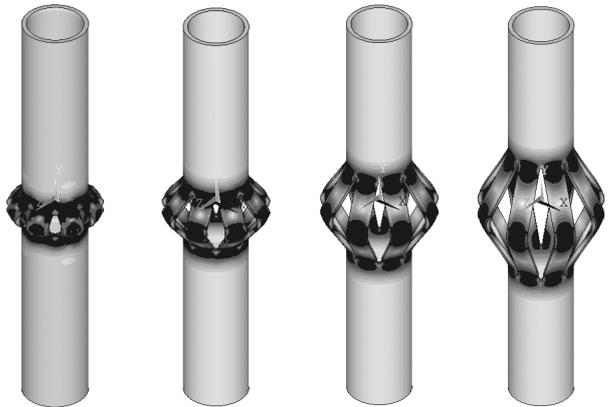
Fig. 12에 나타난 바와 같이, 슬릿을 낸 부분의 양 끝단과 중심부에서 응력이 집중되었다. 이와 같은 응력분포의 경향은 전체 타입에서 비슷하게 나타났다. 또한 슬릿의 길이에 따라 위, 아래 슬릿이 없는 원형 강관 부분이 받는 응력의 크기가 다를 수 있다. Table 4에 슬릿이 없는 원형강관 부분이 받는 응력의 크기를 나타내었다. 원형 강관 부분이 받는 응력의 크기는 슬릿길이가 짧을수록 커지는 것을 알 수 있으며, S4 타입이 S8 타입보다 큼을 알 수 있다. 슬릿이 없는 부분이 받는 응력의 크기로 슬릿이 있는 부분의 슬릿이 있는 부분의 내력 및 최대하중을 예상할 수 있다.

Table 4. Maximum stress of hollow circular part

Type	Slit length (mm)			
	25	50	75	100
S4	131MPa	73MPa	50MPa	20MPa
S8	92MPa	22MPa	18MPa	12MPa



(a) S4 Type (From Left L=25, L=50, L=75, L=100)



(b) S8 Type (From Left L=25, L=50, L=75, L=100)

Fig. 12 Stress distribution

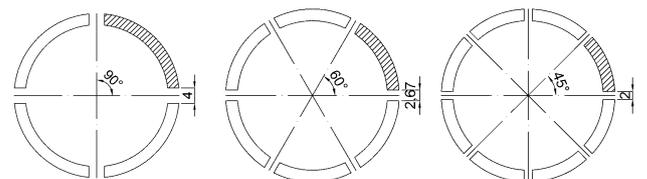
4. 고찰

4.1 부분요소의 유한요소해석

4.1.1 해석개요

제 3장에서 ANSYS의 해석값의 타당성 및 유효성이 증명되었다. 앞에서 설계한 슬릿형 FLD의 거동을 단순화 하여 파악하기 위해, Fig. 13의 빗금 친 부분인 부분 중공 원형 단면을 해석하여 슬릿 개수에 따른 거동을 파악하고자 한다.

S4 타입과 S8 타입으로 거동을 파악하기에는 판별력이 떨어지기 때문에 슬릿개수가 6개인 경우를 추가시켜 해석한다.



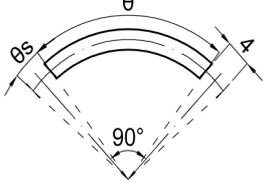
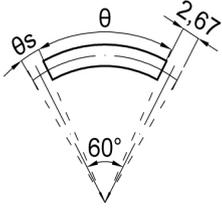
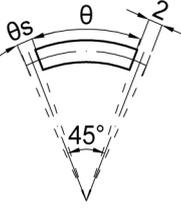
(a) S4 Type

(b) S6 Type

(c) S8 Type

Fig. 13 Basic concept of partial hollow circular section

Table 5. Analysis plan of partial hollow circular section

No.	Name	θ	θ_s	Shape
1	S4-25	78.5	11.5	
2	S4-50			
3	S4-75			
4	S4-100			
5	S6-25	52.3	7.7	
6	S6-50			
7	S6-75			
8	S6-100			
9	S8-25	39.2	5.8	
10	S8-50			
11	S8-75			
12	S8-100			

*Refer

θ : angle of partial hollow circular section

θ_s : angle of slit

실험체명과 같이 슬릿수가 4개인 모델의 경우 S4 타입, 6개인 모델을 S6 타입, 8개인 모델을 S8 타입이라 하고 뒤에 따르는 숫자는 슬릿의 길이를 의미한다. 슬릿의 개수를 변화 시킴에 따른 총 단면적의 변화를 줄이기 위해 슬릿의 개수 (n)와 폭(b)을 이 4개 n 일 때 b 는 2mm, n 이 6개 일 때 b 는 2.67mm, n 이 8개 일 때 b 는 2mm로 정하여 모델링하였다. 중공 원형 단면의 해석계획은 Table 5과 같다.

4.1.2 유한요소모델링

부분 중공 원형 단면을 해석하기 위하여 요소는 3.2.1에서 사용한 것과 같은 Solid 185를 사용하였다. 본 해석에서 슬릿 양단의 경계조건을 고려하여 Fig. 14와 같이 해석모델의 상 하단에 강체(Rigid Body)를 접촉시켰으며 응력-변형을 곡선은 해석모델과 강체에 다르게 적용하였다. 해석모델의 경우 3.2.1항에서 사용한 응력-변형을 곡선을 이용하였고 강체의 경우 탄성체로 가정하였으며 탄성계수는 2.05×10^{10} MPa로 하여 해석모델의 10^6 배의 값을 사용하였다. 해석모델과 강체의 접촉설정은 접촉면을 완전히 접합하기 위해 강접합(Bonded Contact)으로 하였다.

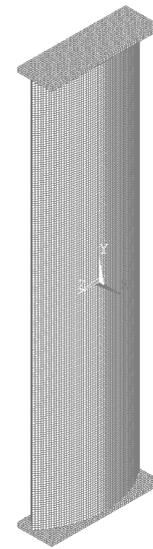


Fig. 14 Analysis modeling of partial hollow circular section

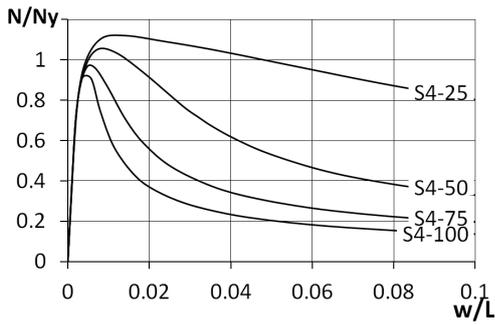
하단 강체의 아랫부분 모든 방향의 이동자유도가 구속되었고 상단 강체의 윗부분 길이방향(y) 자유도를 제외한 모든 이동자유도가 구속되었다. 그리고 상단의 강체 윗부분의 y 방향 변위를 한 점에 집중시켜 앞의 3.2.2항과 같이 소성좌굴 해석을 실시하였다.

4.1.3 해석결과 및 분석

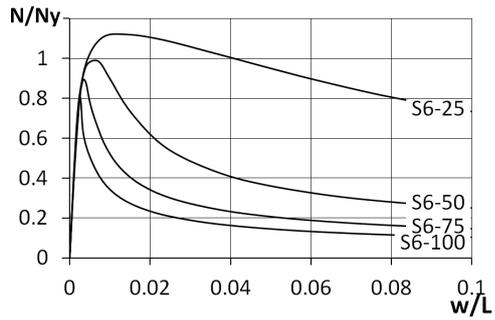
모든 타입에 대해 소성좌굴해석을 진행한 결과를 무차원화 하여 Fig. 15, Fig. 16에 나타난 것과 같이 S4-25, S4-50, S6-25, S8-25의 경우 소성좌굴이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 15을 살펴보면 슬릿길이가 증가 할수록 내력이 감소함을 알 수 있다. 또한 슬릿길이는 일정하게 25mm씩 감소하지만, 내력감소율은 점차 줄어드는 것을 알 수 있다. 이전의 실험과 해석에서 나타나는 현상인 길이증가에 따른 하강곡선의 기울기가 급격해지는 현상이 나타난다.

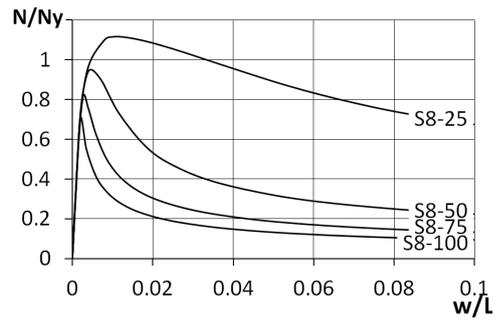
Fig. 16는 슬릿 길이별로 정리한 그래프이다. 최대값 및 내력의 크기는 S4 타입, S6 타입, S8 타입순서로 작아진다. 이를 통해 슬릿 개수가 많아질수록 최대하중 및 내력이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 16(a)에서는 모두 소성좌굴이 일어남을 확인 할 수 있다. (b), (c), (d)를 살펴보면 S4 타입과 S6 타입의 크기 차에 비해 S6 타입과 S8 타입은 거의 비슷하다고 할 수 있다. 특히 S6-100과 S8-100은 거의 일치한다. 하강곡선은 슬릿 개수가 많아질수록 더욱 급격해진다. 최대하중이 가장 높은 타입은 S4-25이며 가장 낮은 타입은 S8-100이다. 길이가 길고 단면이 작은 세장한 타입일수록 좌굴이 잘 일어났고 길이가 짧고 단면이 클수록 압축파괴에 가까운 파괴가 일어났다.



(a) S4 Type

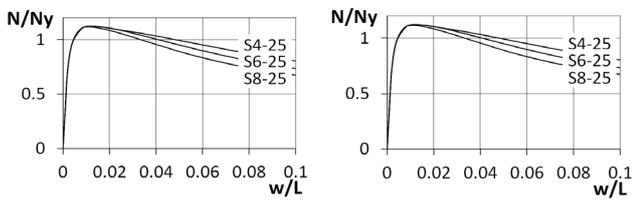


(b) S6 Type



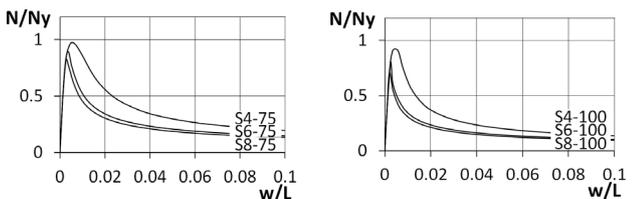
(c) S8 Type

Fig. 15 $N/N_y - w/L$ Curves (1)



(a) L=25

(b) L=50



(c) L=75

(d) L=100

Fig. 16 $N/N_y - w/L$ Curves (2)

4.2 좌굴 후 안정내력과 축방향 변형

4.2.1 이상 샌드위치 단면기둥의 좌굴 후 거동 및 안정내력

이론적으로 중심압축력이 작용하는 기둥의 좌굴 후 거동 및 안전내력을 판단한다. 일반화 소성힌지의 개념을 이용해서 좌굴한 기둥의 중앙이 소성한 이후의 거동을 알아본다. 이론을 단순화 하기위해 응력-변형을 곡선을 완전 탄소성으로 가정하고 단면은 Shanley^{(8),(9)} 모델과 같은 샌드위치단면(참: d_f^{eq} , 단면적: A , Idealized Sandwich Section)으로 가정한다. 또한 휨변형은 무시한다. 양단 핀 기둥이 좌굴해 중앙이 소성한 후 변형한 상태를 Fig. 17에 나타내었다. 이에 따른 해석을 ISS- Column 해석이라 칭한다.

기둥의 좌굴한 이후의 거동은 (2)식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{w}{L} = \frac{N \epsilon_y}{N_y} + \frac{1}{2} \left(\frac{d_f^{eq}}{L} \right)^2 \left[\left(\frac{N_y}{N} \right)^2 - 1 \right] \quad (2)$$

(2)식을 샌드위치단면의 세장비($\lambda = 2 \cdot L/d_f^{eq}$)와 표준화세장비($\lambda_c = \sqrt{N_y/N_E} = (1/\pi) \times \sqrt{\sigma_y/E} \lambda$)를 이용해서 고쳐 쓰면 (3)식과 같다.

$$\frac{N}{N_y} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(\pi \lambda_c)^2 E}{2 \sigma_y} \cdot \frac{w}{L}}} \quad (3)$$

식 (3)에서 응력-변형을 곡선은 완전탄소성곡선으로 가정하였으며 단면은 Shanley의 샌드위치단면 부재로 가정하였기 때문에 해석과 이론의 차가 생길 수 있다. 이를 본 연구에 적용하기 위해서는 해석과 이론차를 줄이기 위해 계수 α 를

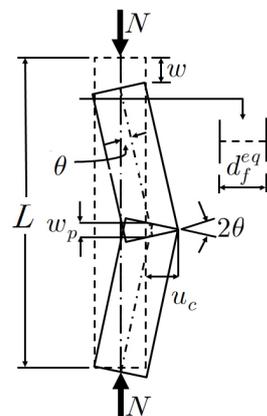


Fig. 17 Deformed shape of ISS-Column

사용한다. 이때 사용된 계수 α 는 슬릿개수 n 에 대한 함수로써 $\alpha = f(n)$ 으로 표시된다. 계수 α 의 적용시켜 식 (3)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{N}{N_y} = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha \frac{(\pi \lambda_c)^2 E}{2 \sigma_y} \cdot \frac{w}{L}}} \quad (4)$$

4.2.2 부분 중공 원형 단면을 이상 샌드위치 단면으로 치환

부분 중공 원형 단면을 이상 샌드위치 단면으로 치환한 것은 Fig. 18과 같다.

이상 샌드위치 단면의 가정은 실제단면과 치환단면의 단면적과 전소성모멘트는 일치한다는 것을 조건으로 한다. 이를 이용하면 d_f^{eq} 는 식 (5)와 같이 표현되어 진다.

$$d_f^{eq} = 2 \sqrt{\frac{I_X}{2A_f^{eq}}} \quad (5)$$

부분 중공 원형 단면의 특성치를 이용하여 타입별 d_f^{eq} 를 구하면 S4 타입은 2.69mm, S6 타입은 1.75mm이고 S8 타입은 0.90mm 이다. 이를 통하여 세장비(λ)와 기준세장비(λ_c)를 구하여 Table 6에 나타내었다.

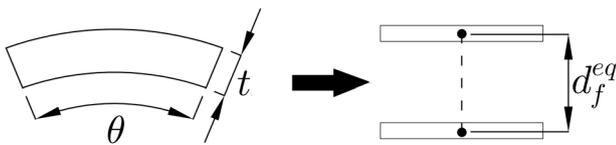


Fig. 18 Substitution to sandwich section

Table 6. λ , λ_c Value of sandwich section

		S4 Type	S6 Type	S8 Type
λ	25	9.280	20.36	36.20
	50	18.56	40.73	72.40
	75	27.84	61.09	108.6
	100	37.12	81.46	144.8
λ_c	25	0.149	0.328	0.582
	50	0.299	0.655	1.164
	75	0.448	0.983	1.747
	100	0.597	1.310	2.329

4.2.3 좌굴 후 안정내력식 제안

부분 중공 원형 단면의 ANSYS 해석결과 값과 이상 샌드위치 단면기둥의 좌굴 후 거동 및 안정내력식(식 (4))을 비교하여 계수 α 값을 산정하였다. α 를 이용한 안정내력식과

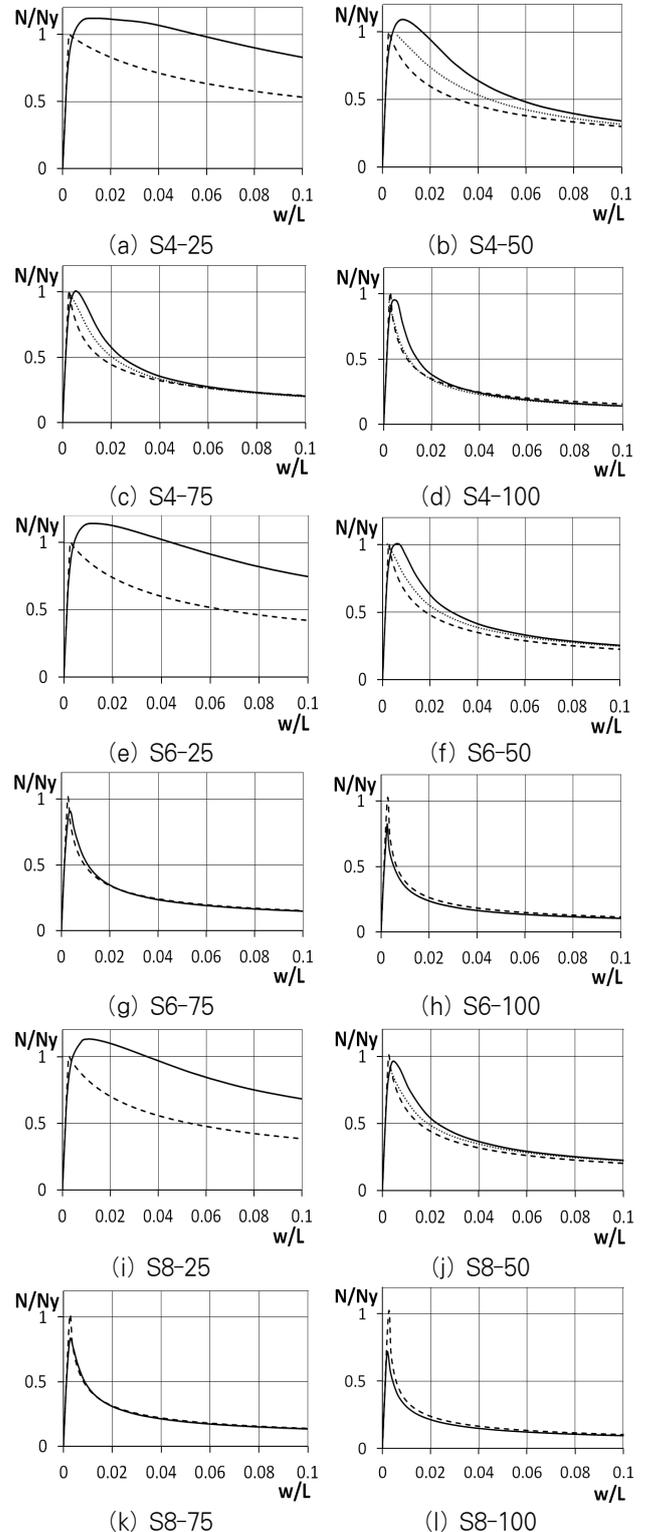


Fig. 19 Comparison ISS column Anal. and ANSYS Anal.

ANSYS 해석결과를 Fig. 19에 나타내었다. 실선이 해석 값이며 점선이 α 를 적용한 안정내력식이다. 소성좌굴이 일어난 S4-25, S4-50, S6-25, S8-25의 경우를 제외하고는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 소성좌굴은 본 연구에서 사용하고자하는 변형집중좌굴방식의 FLD의 거동으로는 부적합 하며, 안정내력식 (4)는 탄성좌굴후의 거동에 관한 식이다. 그러므로 소성좌굴이 발생한 값을 제외하고 α 를 산정하였으며 이들의 평균값을 계산하여 Table 7에 나타내었다.

Table 7에 나타난 값 중 평균 α 를 이용하여 선형회귀분석을 실시하였다. 이를 통해 얻어낸 α 와 n 의 관계는 식 (6)과 같다. 다만, $4 \leq n \leq 8$ 범위에서,

$$\alpha = 1.163 - 0.140n \quad (\text{오차범위 } \pm 0.11) \quad (6)$$

Table 7에 나타난 값 중 평균 α 와 회귀식 (6)을 그래프로 나타내면 Fig. 20과 같다. 모든 값이 오차범위 안에 들어가며, 오차범위는 0.11이다.

식 (4)와 (6)을 이용해 슬릿개수(n)에 따른 슬릿형 FLD의 거동을 (7)식으로 정리할 수 있다. 다만, β 를 식 (8)과 같이 정의하여 정리하였다.

$$\frac{N}{N_y} = \frac{1}{\sqrt{1 + (1.163 - 0.140n)(\beta\lambda_c)^2 \frac{w}{L}}} \quad (7)$$

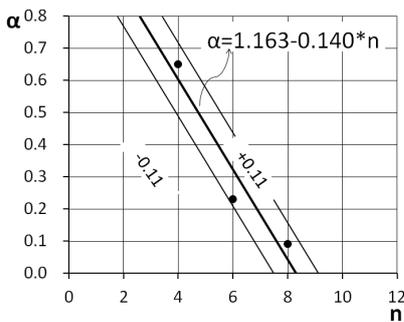


Fig. 20 Result of linear regression analysis

Table 7. α Values of formular (4)

	S4 Type	S6 Type	S8 Type
25	plastic buckling	plastic buckling	plastic buckling
50	plastic buckling	0.18	0.08
75	0.6	0.23	0.09
100	0.7	0.28	0.01
Average α	0.65	0.23	0.09

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{2\sigma_y}} = 2.22 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (8)$$

위 식은 탄성좌굴후의 거동을 설명하는 식이다. 유한요소 해석 결과 S4-25, S4-50, S6-25, S8-25타입은 비탄성좌굴의 거동을 보였고, 식 (7)과는 큰 차이를 나타내고 있다. 또한 슬릿길이가 100mm를 넘어갈 경우 FLD는 매우 낮은 내력을 가질 것이며 FLD가 기하학적, 구조적으로도 불안정하다. 이와 같은 내용을 고려하여 사용범위를 다음과 같이 제한한다.

$$4 \leq n \leq 8 \text{ 범위에서, 탄성좌굴 발생시}$$

$$n = 4 \text{인 경우 } 100 \text{ mm} \geq L \geq 75 \text{ mm} \quad (9)$$

$$n = 6, 8 \text{인 경우 } 100 \text{ mm} \geq L \geq 50 \text{ mm}$$

좌굴 후 안정내력을 고려하기 위해, Fig. 21과 같이 층간 변위각 0.04rad의 특수모멘트골조인 라멘을 상정하였다.

주두의 수평변위를 δ , 층높이를 h 라고 하면, 층간변위각 R 과 주두의 수평변위를 δ 는 다음 식과 같이 정의되어진다.

$$R = \frac{\delta}{h} \quad (10a)$$

$$\delta = \frac{\epsilon_B L_B}{\cos \alpha} \quad (10b)$$

여기서 ϵ_B 는 가새의 변형률이며, 위식을 정리하면 다음과 같다.

$$R = \frac{\epsilon_B L_B}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{h} = \frac{\epsilon_B}{\cos \alpha} \cdot \left(\frac{L_B}{h} \right) \quad (11)$$

$$\therefore R = \frac{2\epsilon_B}{\sin 2\alpha}$$

스팬 10m, 층고 3m인 골조의 경우 $\alpha \approx 0.3 \text{ rad}$ 이므로

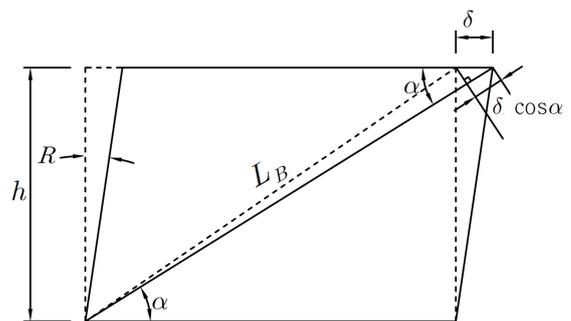
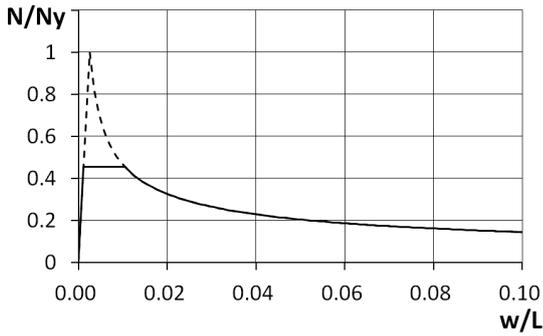
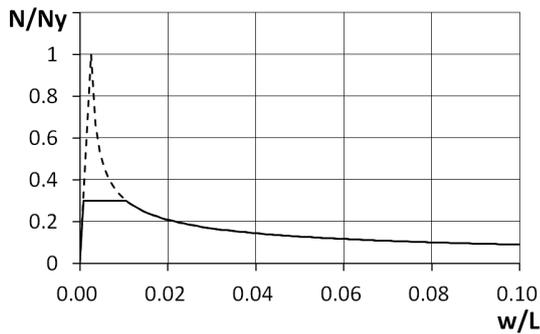


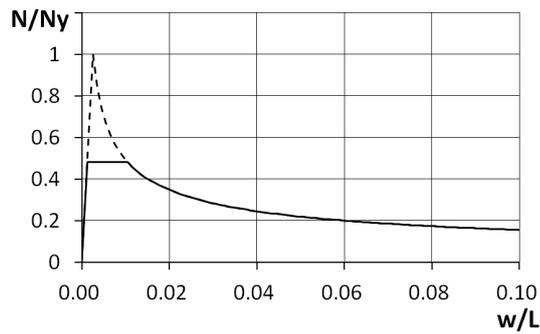
Fig. 21 Special Moment-Resisting Steel Frame



(a) S4-100



(a) S6-100



(c) S8-100

Fig. 22 $N/N_y - w/L$ curves of formulor (7), (8)

(11)식으로부터 $\epsilon_B = 0.01$ 이 되고, $\epsilon_B = w/L$ 이므로 (7)식에서 $w/L > 0.01$ 의 범위에 대해서 유효하다고 볼 수 있다. 최대 하중은 $0 \leq w/L \leq 0.01$ 범위 내에 존재하지만, $w/L = 0.01$ 일 때의 내력을 안정내력으로 본다.

Fig. 22는 식 (7)과 (8)을 통하여 그린 그래프로 슬릿길이가 100mm인 S4-100, S6-100, S8-100에 나타내었다. 점선은 관계식을 통해 얻어낸 값이며, 실선은 $w/L = 0.01$ 구간을 불안정 하다고 가정하여 재조정된 그래프 이다. 이와 같은 방식으로 슬릿개수(n)과 슬릿길이(L)로 $N/N_y - w/L$ 곡선을 그려 슬릿형 FLD의 좌굴 후 거동 및 안정내력을 파악할 수 있다.

5. 결 론

본 연구의 목적은 변형집중형 슬릿형 FLD의 좌굴 후 거동 및 안정내력을 파악하고 이를 정식화하는 것이다. 슬릿의 개수와 슬릿의 길이를 변수로 하여 1축압축실험 및 유한요소 해석을 수행하였다. 또한, 단순해석모델을 이용하여 하중-변위관계를 정식화 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 슬릿형 FLD의 압축실험과 ANSYS를 통한 해석결과, 슬릿개수(n)와 슬릿길이(L)가 증가할수록 최대하중 및 내력은 감소하였으며 하강곡선의 기울기는 더욱 급격해졌다. 슬릿형 FLD의 압축실험과 ANSYS를 통한 해석의 결과는 비교적 일치하므로 해석의 타당성 및 유효성이 입증된 것으로 판단할 수 있다.
- (2) 본 연구의 제한식은 슬릿형 FLD의 탄성좌굴 이후의 거동을 대상으로 하므로 다음과 같이 슬릿개수(n)에 대한 슬릿길이(L)의 제한이 필요하다.

$4 \leq n \leq 8$ 의 범위에서, 탄성좌굴 발생시

$n = 4$ 인 경우 $100 \text{ mm} \geq L \geq 75 \text{ mm}$

$n = 6, 8$ 인 경우 $100 \text{ mm} \geq L \geq 50 \text{ mm}$

$$\frac{N}{N_y} = \frac{1}{\sqrt{1 + (1.163 - 0.140n)(\beta\lambda_c)^2 \frac{w}{L}}}$$

$$\text{다만, } \beta = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{2\sigma_y}} = 2.22 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$$

또한 각 슬릿개수에 대한 설계강도는 $w/L = 0.01$ 일 때의 내력(N/N_y)을 기준으로 하면 타당한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(No. NRF-2011-0024207).

또한, 이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌(References)

- [1] 박만우, 주영규, 김명환, 김지영, 김상대(2008) 고강도강 비좌굴 가새의 구조성능 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제1호, pp.33-42.

Park, M.W., Ju, Y.K., Kim, M.H., Kim, J.Y., and Kim, S.D. (2008) Structural Performance Evaluation of Buckling-Restrained Braces Made of High-Strength Steels, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 1, pp. 33-42 (in Korean).

[2] 김도현, 주영규, 김명환, 성우기, 김상대(2009) 하이브리드 비좌굴 가새의 진동제어능력에 관한 실험적 연구, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제21권, 제1호, pp.83-91.

Kim, D.H., Ju, Y.K., Kim, M.H., Sung, W.G., and Kim, S.D. (2009) Experimental Study on the Vibration Control Capacity of Hybrid Buckling-Restrained Braces, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 21, No. 1, pp.83-91 (in Korean).

[3] 김철환, 채원탁, 오영석, 김채영(2013) 좌굴전 항복유도장치(FLD) 개발에 관한 연구, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.279-287.

Kim, C.H., Chae, W. T., Oh, Y.S., and Kim, C.Y. (2013) A Study on the Development of Force Limiting Devices (FLD) which Induce Yielding before Elastic Buckling, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 25, No. 3, pp. 279-287 (in Korean).

[4] Geraed Andrew Roger Parke (1988) *The behaviour of space truss incorporating novel compression members*, Ph.D Thesis, Department of civil eng., University of Surrey, UK.

[5] Schmidt, L.C. and Hanaor, A. (1979) Force Limiting Devices in Space Trusses, *Journal of the Structural Division ASCE*, Vol. 105, No. ST5, pp.939-951.

[6] Motohide Tada (1993) *A study on the combined non-linear analysis of space truss and improvement of seismic capacity by buckling control system*, Ph.D Thesis, Osaka university, Japan.

[7] Ramberg, W. and Osgood, W.R. (1943) Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902, *National Advisory Committee For Aeronautics*, Washington DC.

[8] Shanley, F.R. (1946) The Column Paradox, *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 13, No. 12, pp.678.

[9] Shanley, F.R. (1947) Inelastic Column Theory, *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 14, No. 5, pp.261-268.

요 약 : 본 연구는 압축가새의 변형을 FLD부분에 집중시켜 압축가새의 좌굴안정성을 확보하는 슬릿형 FLD에 관한 것이다. 4개 및 8개의 슬릿형 실험체를 슬릿길이 별로 단순압축실험하였다. 그 결과를 유한요소해석과 비교 검토하여 해석의 유효성을 입증하였다. 또한 전단면을 구성하는 단위요소를 이상화된 샌드위치 단면으로 치환하여, 슬릿개수와 슬릿길이를 변수로 하는 압축력과 축방향 변형의 관계식을 유도하였다. 이 식은 주어진 범위 내에서 실험결과와 좋은 대응을 보인다. 본 연구는 FLD설계의 기본데이터로써 이용 될 수 있다.

핵심 용어 : 슬릿형 FLD, 가새, 좌굴안정성, 슬릿형 FLD의 압축실험, 설계식
