

좌굴전 항복유도 장치(FLD) 개발에 관한 연구

김철환¹⁾ · 채원탁^{2)*} · 오영석³⁾ · 김채영⁴⁾

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

A Study on the Development of Force Limiting Devices(FLD) which Induce Yielding before Elastic Buckling

Kim, Cheol Hwan¹⁾ Chae, Won Tak^{2)*} Oh, Young Suk³⁾ Kim, Chae Yeong⁴⁾

¹⁾ Professor, School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

²⁾ Researcher, School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 742-711, Korea

³⁾ Professor, School of Architectural Engineering, Daejeon University, Daejeon, 300-716, Korea

⁴⁾ Graduate Student, School of Architectural Engineering, Daejeon University, Daejeon, 300-716, Korea

ABSTRACT : The steel members are applied to high rise building since they have high strength compare to the concrete member. On the other hand, the elastic buckling is likely to occur in steel member because of their small section. When the elastic buckling occur, the steel structure lose a load carrying capacity. The steel frame would be unstable due to a rapid decline in strength by buckling. The purpose of this study is the development of FLD(Force Limiting Device) to prevent a elastic buckling for a slender member. Further, the behavior of steel structures with FLD would be stable by high energy absorption capacity. The proposed type of FLD is the type of out-of-plane resistance. In this study, member test and FEM analysis for proposed type were performed. The test parameters are thickness and gradient angle of out-of-plane plate. The proposed type may be effective method for FLD.

KEYWORDS : force limiting device, out-of-plane resistance, load-displacement relationship, failure mode, yield line theory

1. 서론

강구조물은 콘크리트 등의 다른 구조재료에 비해 비강도가 높아 작은 단면으로 큰 하중을 지지할 수 있어서 초고층 구조물, 장스팬의 대공간구조물 등에 많이 적용하고 있다. 작은 단면으로 경제적인 부재설계가 가능하기 때문에 부재의 길이에 비해 단면이 작은 세장한 부재가 되기 쉽다. 브레이스나 대공간 구조물의 트러스 부재 등은 작은 단면을 효율적으로 구성하여 외력에 저항하기 때문에 부재의 단면이 세장해져서 압축력이 작용할 경우, 부재가 항복하기 이전에 탄성좌굴이

발생하게 된다. 강부재의 탄성좌굴은 부재내력을 급격하게 저하시켜 취성적인 파괴에 도달하게 되고, 종국적으로는 구조체 전체에 큰 손상을 발생시킨다. 따라서 구조물이 좌굴 등과 같은 급격한 내력저하가 발생하는 원인을 제거하고 안전하게 설계하기 위한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 세장한 철골부재에 압축력이 작용할 때, 부재에 작용하는 응력의 크기가 탄성좌굴 응력에 도달하기 전에 항복하도록 유도하는 장치인 응력제한 장치(Force Limiting Device, 이하 FLD라 함)를 제안하여 부재의 좌굴로 인한 급격한 내력의 저하 및 이로 인한 부재의 파괴가 발생하지 않고 안정적으로 거동을 하도록 하는 장치를 개발 하는 것을 목적으로 한다.

Note.-Discussion open until December 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 16, 2013; revised May 21, 2013; approved on June 3, 2013. © KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-54-530-1370 Fax. +82-54-530-1379
E-mail: cwtak@hanmail.net

2. 이론적 고찰

2.1 기존의 연구

국내에서는 강구조물의 좌굴 방지를 위한 연구가 부분적으

로 진행되어 왔으며, 주로 브레이스가 설치된 구조물에 있어서 수평하중에 의해 브레이스가 압축을 받을 경우, 좌굴 발생을 방지하고 구조체가 안정적으로 거동하도록 하는 것을 목적으로 하고 있다. 특히, 박만우 등(2008)은 H형강 심재와 외부에 각형강관으로 보강하여 좌굴이 억제되도록 한 연구^[1]를 진행하였으며, 김도현 등(2009)은 심재와 보강재 사이에는 콘크리트를 충전하지 않고 심재와 보강재 사이에 비부착 물질을 사용하여 심재에 작용하는 하중이 보강재에 전달되지 않는 시스템을 개발하여 구조적 특성을 규명한 실험 연구^[2]를 진행하였다. 박준희 등(2008)은 각형의 강재튜브 속에 중심부재를 위치시키고 튜브와 중심부재 사이에 콘크리트를 채워 좌굴에 저항하도록 설계된 브레이스의 이력거동에 대한 실험적 연구^[3]를 진행하였다. 이들은 주로 세장한 부재의 좌굴 방지를 위해 부재를 보강함으로써 좌굴에 대해 저항하는 것을 목적으로 연구가 진행되어 왔다.

한편, 영국과 일본 등지에서는 세장한 부재의 좌굴을 방지하기 위해 부재의 보강과 더불어 특정 부위에 있어서 작용하는 응력을 제한하는 연구가 진행되어 왔다. Parke(1988)는 압축부재로 이루어진 대공간 트러스의 거동에서 압축부재에 FLD도입을 연구^[4]하였으며, Schmidt, L 등(1979)은 2층 입체 트러스에 내재하는 비정형 배열에 의해 트러스의 재하 능력이 크게 차이가 나는 것을 확인하고 부재가 좌굴하중에 도달하기 이전에 안정적인 항복을 유도하는 FLD장치의 개발^[5]을 시도하였다. Tada, M(1993)는 FLD를 도입한 입체 평면 트러스에 있어서 부재의 시공오차를 흡수하기 위해 부재에 FLD를 부착한 경우를 상정하여 구조물의 이력거동을 해석적으로 규명하여 FLD의 유효성을 입증^[6]하였다. 그러나 FLD에 대한 지금까지의 연구는 대부분 이론적으로 진행되어 왔으며, 특정한 형태의 FLD를 기준으로 하중의 지지능력을 정확하게 규명하지 못한 한계를 가지고 있다.

2.2 응력제한 장치(Force Limiting Device)의 개념

FLD의 기본개념 및 하중-변형 관계곡선은 Fig. 1^{[6],[7],[8],[9]}에 나타내고 있다. 그림에서와 같이 압축력을 받는 부재가 탄성좌굴이 발생하기 이전에 항복하도록 유도하여 좌굴발생으로 인한 급격한 내력의 저하가 발생하지 않고 안정적으로 거동하도록 하는 것으로서 에너지 흡수능력도 크게 향상되게 된다. 따라서 이러한, FLD를 개발하여 입체 대공간구조의 시공오차 및 강구조물의 브레이스에 적용함으로써 구조물의 안전을 확보하는 것이다.

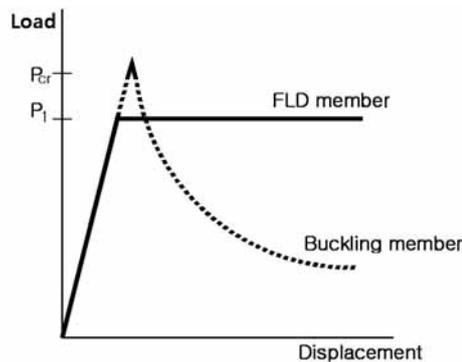


Fig. 1 Concept of FLD member

Table 1. Method of FLD

No	Feature		Shape
1	Hydraulic cylinder type	The device operates by exceeding the fixed pressure	
2	Material deformation type	The device absorbs energy by plastic deformation of thin tubes	
3	Friction type	The device operates by pushing or pulling a metal rod through the center of a four bladed cutting tool	

2.3 응력제한 방식

부재가 좌굴하중에 도달하기 이전에 응력제한 장치가 항복하여 부재가 좌굴하중에 도달하지 않도록 하는 장치를 개발하는 것을 목표로 하고 있으며, 구체적인 응력제한 방식^[7]은 아래 Table 1과 같다.

Table 1에서와 같이 응력제한 방식은 크게 3가지 형식으로 구분할 수 있으며, 유압형식은 기본 장치의 제작, 설치, 경제성 등에서 비효율적이며, 또한 초기 하중작용 시 적절한 거동에 어려움이 따른다. 마찰 제한방식은 하중작용 시 최대 정지마찰력 이후 소성구간에서 안정적인 거동을 나타내지만, 최대 정지마찰력이 부재의 탄성좌굴하중 보다 크게 나타날 수 있는 문제점이 있다.

Table 2. Test specimens

No	Name	Method of FLD		Shape
		Type	Thickness	
1	TP	Out of Plane	2.8mm	
			4.0mm	
			5.0mm	
			8.0mm	
2	TS	Out of Plane (30°)	2.8mm	
			4.0mm	
			5.0mm	
			8.0mm	

3. 실험체 계획

3.1 응력제한 장치 계획

본 연구에서는 응력제한 장치로서 부재단면의 면외방향 하중에 대해 항복하도록 유도한 재료변형의 응력제한 방식을 제안하고 계획하였다. 실험체 제작에 사용된 강재는 SS400급 강재를 사용하였다. 실험체의 규모 및 사용은 높이 30cm의 원형강관을 사용하였으며, 부재 치수는 원형강관 $\varnothing 42.7 \times 2.9$, $\varnothing 76.3 \times 3.2$ 를 사용하였다.

Table 2에서는 응력제한 방식의 실험체 계획을 나타낸다.

실험체는 면외저항 단면의 경사도(0° , 30°)를 기준으로 TP, TS Type으로 구분을 하였으며, TS Type은 TP Type에 비해 높은 변형능력을 가지도록 상정하여 계획하였다. 각 Type별 면외 저항단면의 두께를 변수로 하여 각각 2.8mm, 4.0mm, 5.0mm, 8.0mm로 제작하였다. Fig. 2에서는 실험체 형상을 나타내고 있다.

3.2 실험체 설치 및 측정방법

실험은 용량 600kN의 만능재료시험기(UTM)에 실험체를



(a) TP type



(b) TS type

Fig. 2 Shape of FLD

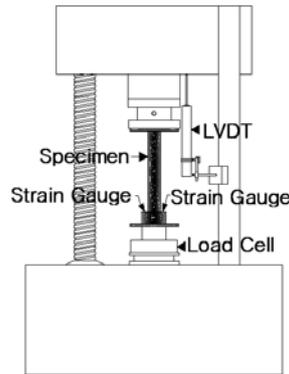


Fig. 3 Set-up of specimen

설치하여 압축실험을 실시하였으며, 하중, 변위, 거동 등의 정확한 실험결과를 취득하기 위해 별도로 로드셀과 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였으며, 실험체의 변형율을 판단하기 위하여 중앙부에 축방향으로 스트레인게이지를 부착하였다.

실험의 진행은 파괴를 상정하여 설치된 면외저항면이 완전히 파괴 및 변형이 발생할 때까지 변위제어를 하였다. 변위제어속도는 2mm/min으로 하였다. Fig. 3은 실험체 설치상황을 나타낸다.

3.3 재료시험

실험체 제작에 사용된 강재의 기계적 특성 및 성질을 파악하기 위하여 시편을 제작하여 인장강도시험을 실시하였다.

$\varnothing 42.7 \times 2.9$, $\varnothing 76.3 \times 3.2$ 원형강관에서 각각 3개씩 총 6

Table 3. Mechanical properties of steel

Grade	Section	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield ratio	Elongation (%)
SS400	∅42.7×2.9	371	433	0.86	43%
	∅76.3×3.2	436	500	0.86	31.5%

개의 인장시편을 제작하여 재료시험을 수행하였다. 재료시험은 한국공업규격의 금속재료 인장시험편(KS B 0801)에 따라 제작하였으며, KS B 0802에서 규정하는 실험방법에 준하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 SPP400 강재의 기계적 특성은 Table 3에 나타난다. SS400급 강재를 사용하였으나, 실제로는 보다 높은 항복강도를 나타내고 있다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 하중-변위관계

Fig. 4에서는 각 실험체 Type별 하중-변위관계를 나타내고 있다. TP Type 실험체 모두 탄성구간 이후 소성영역에서 안정적인 거동을 나타내며, 변위 10mm를 전후하여 파단까지 하중의 증가가 나타났다. 면외저항 단면의 두께에 비례하여 강도증감을 나타내고 있으며, 특히 두께가 얇을수록 변형이 진행됨에 따라 조기에 강도의 저하가 발생하고 또한 조기에 강도의 재상승도 나타나고 있다.

TP Type인 경우에는 TP-2.8, 4, 5 실험체는 변위가 10.0 mm 내-외에서 용접부의 파단으로 실험을 종료하였다. 이는 면외저항부분은 폭이 약 15.0mm 정도인 것을 감안하면 용접부의 회전각이 1.0rad.이상에서 파단이 발생한 것을 알 수 있다.

TS Type 실험체는 하중-변위관계에서 알 수 있듯이 TP 실험체에 비해 강도의 초기항복 후 저하도 크게 나타나고 있으며, 변형이 진행함에 따라 내력의 재상승도 늦게 나타나고 있다. 그러나, 실험체 계획시 상정한대로 TP 실험체에 비해 큰 변형능력을 나타내고 있으며, 이는 TP 실험체에 비해 2배 전후의 변형능력을 나타내고 있다. 이러한 변형능력의 증가는 TS실험체의 경우, 면외저항판이 30°의 경사를 가짐으로 인해 수평으로 제작된 TP 실험체에 비해 상하방향으로 ±0.577 mm 정도 여유를 가지게 된 것으로 판단된다. 따라서 큰 변위가 요구되는 경우에는 경사각을 조절함에 따라 요구되는 변위를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 각 실험체별 최대하중을 비교하여 나타낸다. 면외저항판의 두께에 따라 내력의 차이는 크게 나타나고 있으며, TP, TS 실험체를 비교하면 두께가 얇은 T=2.8 실험체

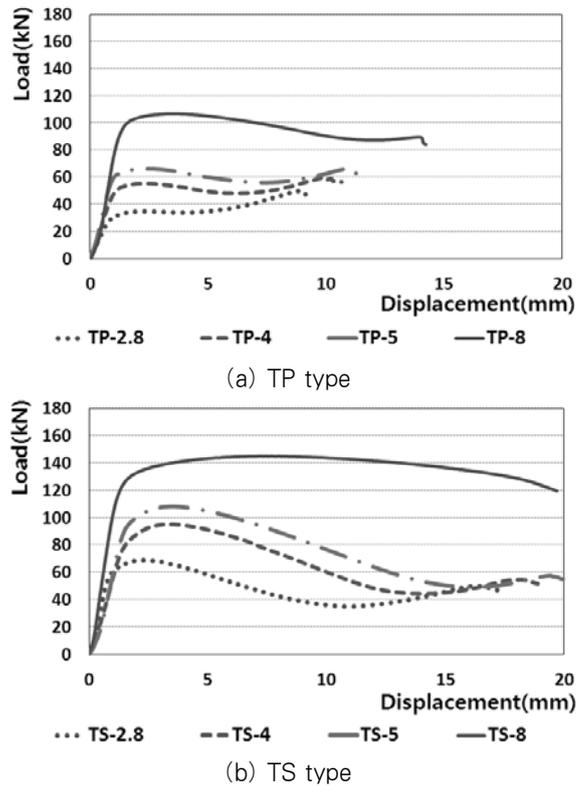


Fig. 4 Load-displacement relationship

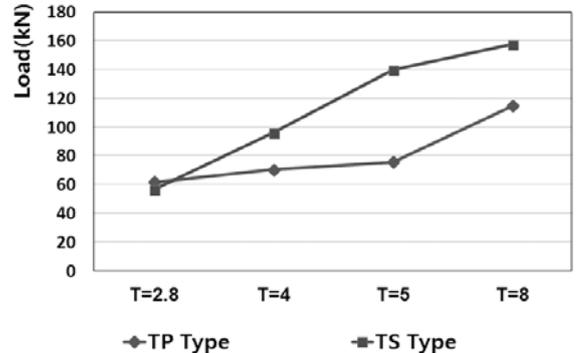
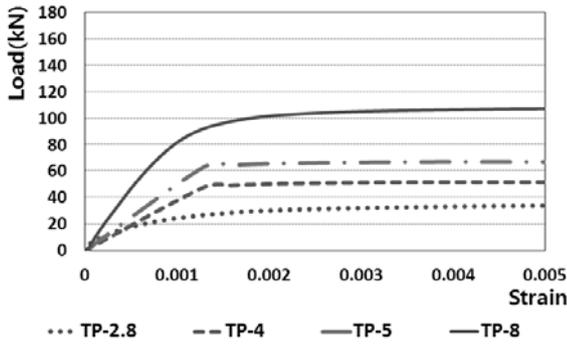


Fig. 5 Maximum load (Experiment)

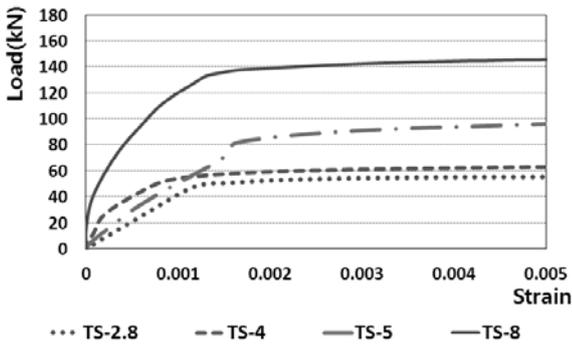
의 경우에는 내력에서 큰 차이가 나타나지 않고 있으나, 두께가 두꺼운 경우에는 TS 실험체가 높은 내력을 나타내고 있다.

이는 면외항복판이 경사를 가짐으로 인해 초기에는 단면이 압축에 저항하다가 변형이 진행됨에 따라 단면이 면외 휨에 대해 저항하기 때문으로 판단된다.

Fig. 6에서는 각 실험체 Type별 하중-변형률 관계곡선을 나타낸다. 모든 실험체가 항복후 내력의 증가없이 변형율만 증가하고 있어 단면이 소성상태로 진입하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 모든 실험체가 항복변형율($\epsilon_y = \sigma_y / E = 0.0018$) 이전에 항복에 진입하고 있으나, 이는 실험체 제작과정상의 결함 또는 게이지의 부착위치의 차이에 의한 것으로 추정된다.

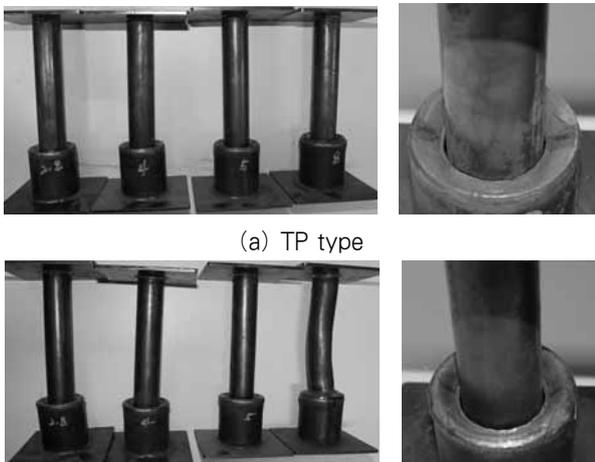


(a) TP type



(b) TS type

Fig. 6 Load-strain relationship



(b) TS type

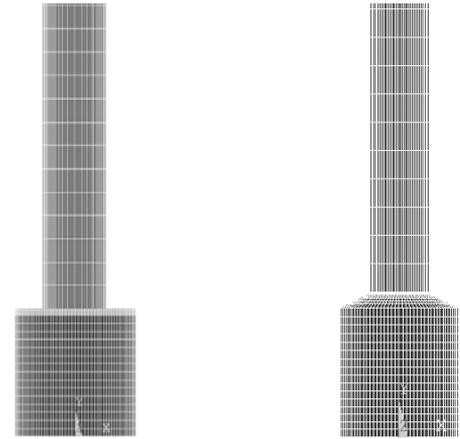
Fig. 7 Failure modes

4.2 파괴양상

Fig. 7에서는 각 Type별 실험체 파괴양상을 나타낸다.

TP Type 중 TP-2.8, 4, 5는 최대변형 이후 면외저항면의 용접부분에서 파단이 나타났으며, TP-8은 용접부의 파단 없이 면외저항 단면의 최대변위까지 변형하였다.

TS Type에 있어서는 TS-2.8, TS-4에서는 면외저항 단면의 최대변형 이후 용접부분에서 용접부 파단이 나타났으며,



(a) TP type

(b) TS type

Fig. 8 Analysis modeling

TS-5는 최대변위까지 변형하였으나, TS-8은 면외저항면의 변형과 더불어 상부 하중기둥의 휨변형이 발생하였다.

5. 이론적 고찰

5.1 유한요소해석

5.1.1 해석 모델

각 실험체에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 S/W는 범용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 사용된 Element는 Solid 185이며 Fig. 8은 해석 모델링을 나타낸다. 이와 같이 모델링을 하여 하단은 U_x , U_y , U_z 방향을 구속하였고 상단은 U_x , U_y 방향을 구속하였다. 또한 변위제어방식을 이용하여 상단의 변위를 U_y 방향으로 TP Type은 10mm, TS Type은 20mm씩 변위를 주어 해석을 수행하였다.

5.1.2 해석 결과

해석결과는 Fig. 9, Table 4에 나타낸다. Fig. 9는 실험체의 응력분포를 나타내고 있으며, Table 4는 각 실험체의 최대 응력을 나타내고 있다. 해석결과 면외저항 단면의 두께에 따라 최대응력의 차이는 발생하고 있으나, 10%전후의 차이로서 유의한 차이는 없는 것으로 판단된다.

TP Type의 응력분포도를 보면 TP-2.8, 4, 5에서는 면외저항 부위에 응력이 집중되어 있으며, TP-8은 면외저항부위 및 상부 하중기둥부재에도 응력이 분산되어 최대응력이 405.0N/mm^2 으로 가장 낮게 나타났다. TS Type에서 최대응력은 TS-2.8에서 441.1N/mm^2 로 가장 높게 나타났으며, TS-4와 8은 유사한 값을 나타내고, TS-5에서 가장 낮은 값

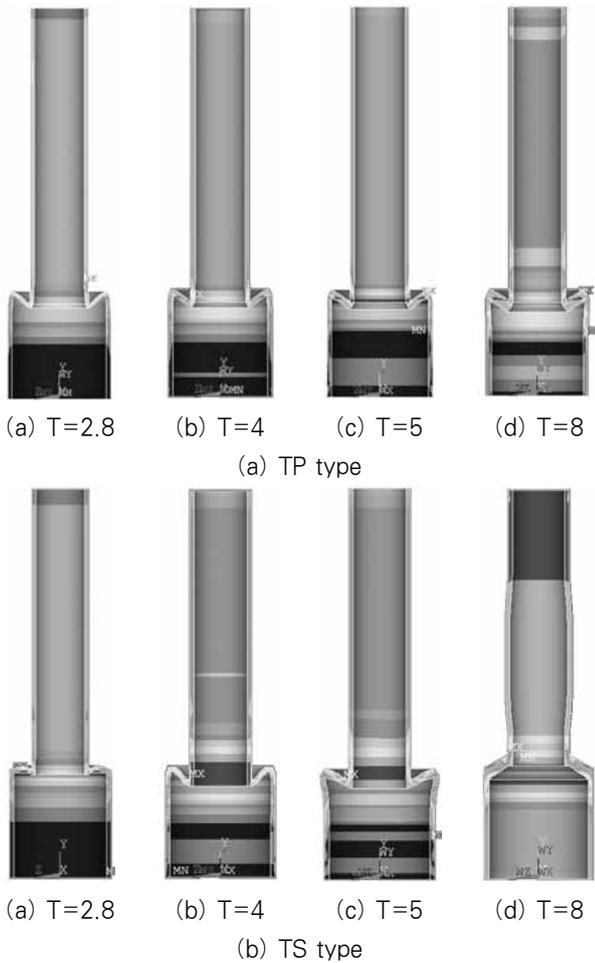


Fig. 9 Stress distribution (Analysis)

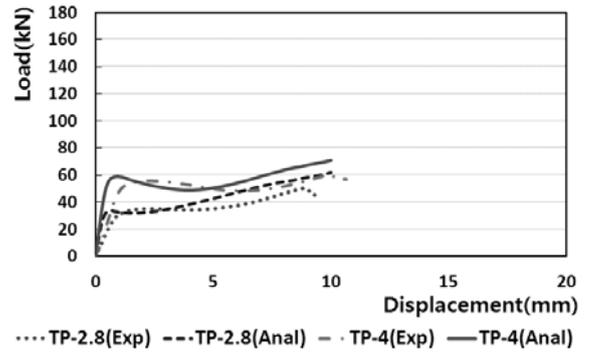
Table 4. Maximum stress (Analysis)

Type	Thickness	Maximum stress (N/mm ²)
TP	2.8mm	438.7
	4.0mm	443.1
	5.0mm	431.2
	8.0mm	405.0
TS	2.8mm	441.1
	4.0mm	431.3
	5.0mm	423.3
	8.0mm	430.1

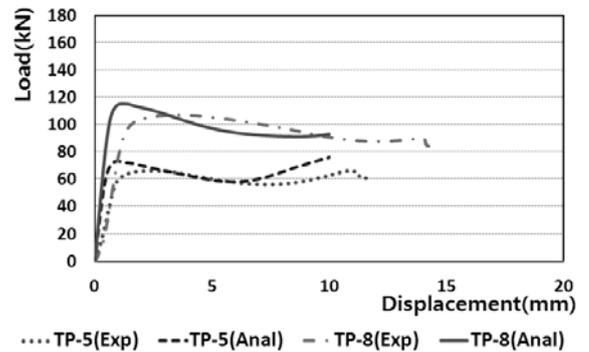
을 나타냈다. 또한, TS-8 실험체에 있어서는 실험결과와 동일하게 면외보강 판이 항복하기 이전에 강관이 항복하여 파괴에 도달하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10에서는 각 Type별 수치해석에 따른 하중-변위 관계를 실험결과와 비교하여 나타내고 있다.

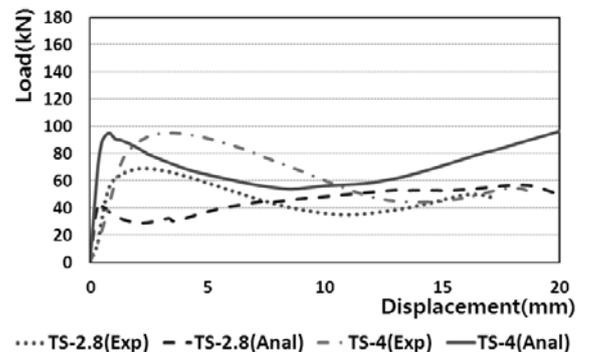
TP-2.8에서 초기강성은 수치해석이 높게 나타나며, 항복하중은 실험치와 유사하게 나타난다. TP-4에서는 수치해석



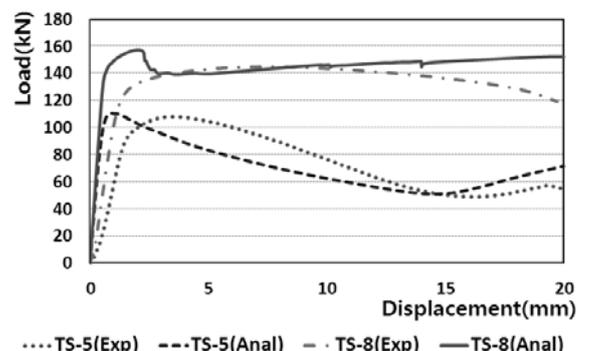
(a) TP-2.8, TP-4 type



(b) TP-5, TP-8 type



(c) TS-2.8, TS-4 type



(d) TS-5, TS-8 type

Fig. 10 Load-displacement relationship

이 초기강성 및 항복하중이 실험결과보다 높게 나타나며, 변위가 5mm 이후 증가할수록 하중 또한 증가추세를 나타낸다. TP-5에서 수치해석의 초기강성 및 항복하중은 실험치 보다

높게 나타나며, 실험결과와 유사한 거동을 나타낸다. TP-8에서도 초기강성이 높게 나타나며, 항복하중은 실험결과 보다 개략 10% 높게 나타난다. 수치해석시 TP Type의 최대변위를 10mm로 제한하였으며, 최대하중은 62.0kN~115.1kN의 범위를 나타낸다.

TS Type은 최대변위를 20mm로 제한하였으며, TS-2.8에서 실험결과가 수치해석보다 높은 항복하중을 나타냈으며, TS-4는 수치해석 및 실험결과와 항복하중은 유사한 값을 나타낸다. 변위 10mm 이후 수치해석의 하중증가가 다른 실험체에 비해 증가 추세를 나타낸다. TS-5의 수치해석 및 실험결과는 유사한 거동을 나타내며, TS-8의 항복하중은 수치해석이 높게 나타나지만 실험결과와 유사한 거동형태를 나타낸다. 최대하중은 56.8kN~157.8kN을 나타낸다. 수치해석에 의한 각 Type별 최대하중은 실험치와 유사하게 나타난다.

5.2 항복선 이론에 의한 최대강도

면외저항 단면에 있어서 외관과 내관의 용접부분을 강접합부로 가정하면 면외 방향으로 작용하는 하중에 의해 용접부는 항복선이 발생하게 되고 그 외의 면외저항 면은 항복장이 발생하게 된다. 면외저항 단면을 강소성체로 가정하면, 항복선 이론^[10]에 따른 최대강도는 아래와 같다.

내부 일의 증분(dW_i)은 항복장에 의한 내부일의 증분($dW_{i(F)}$)과 항복선에 의한 내부일의 증분($dW_{i(l)}$)으로부터 산정할 수 있으며 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 dW_i &= dW_{i(l)} + dW_{i(F)} & (1) \\
 dW_{i(F)} &= 2M_p \pi d \Delta_A \\
 &= 2M_p \cdot d \Delta_A \cdot \pi \cdot \frac{2\overline{OC}}{AC} \\
 dW_{i(l)} &= M_p \cdot d\theta \cdot l \\
 &= 2M_p \cdot d \Delta_A \cdot \pi (\overline{OC} + \overline{OA}) / (\overline{OC} + \overline{OA}) \\
 \text{여기서, } d\theta &= d \Delta_A / (\overline{OC} - \overline{OA}), \\
 l &= 2\pi (\overline{OA} + \overline{OC}) \text{로 표현할 수 있다.}
 \end{aligned}$$

한편, 외부일에 의한 증분은 아래와 같이 표현된다.

$$dW_e = P \cdot d \Delta_A \quad (2)$$

따라서, 가상일의 원리로 부터

$$dW_i = dW_e \text{ 이므로,}$$

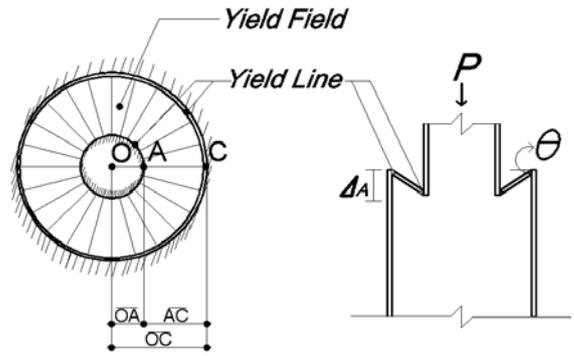


Fig. 11 Yield line

$$\begin{aligned}
 \therefore P &= \frac{4\pi(\overline{OC})}{AC} M_p & (3) \\
 M_p &= \frac{bh^2}{4} \sigma_y
 \end{aligned}$$

Fig. 11은 항복선이론에 의한 실험체의 파괴형태를 나타낸다.

5.3 최대강도

Table 5는 실험체의 항복하중을 나타내고 있다. 항복선 이론에 의한 붕괴하중, 실험 및 해석에 의한 각 항복하중의 비교를 나타낸다.

TP Type에서 붕괴하중 대비 실험치와 해석치의 비율은 약 60%~187%의 범위에 있으며, TP-2.8에서는 이론값보다 실험치와 해석치 모두 53%~73%정도 높게 나타났다. TP-4에서는 붕괴하중과 실험치는 비슷한 값을 나타내고, 이후 TP-8에서는 실험치와 해석치 보다 붕괴하중이 약 40%정도 높게 나타났다. 면외저항 단면의 두께가 증가 할수록 항복선이론에 의한 붕괴하중이 실험치와 해석치 보다 증가하는 경향을 나타냈다. TS Type에서 면외저항단면의 경사(30°)를 고려한 항복선이론에 의한 붕괴하중을 산정하였으며, TS-8에서는 붕괴하중이 실험치와 해석치에 비해 약 20%~30% 정도 높게 나타났으나, TS-2.8, 4, 5에서는 이론값 보다 실험치와 해석치가 개략 30%~150%정도 높게 나타났다.

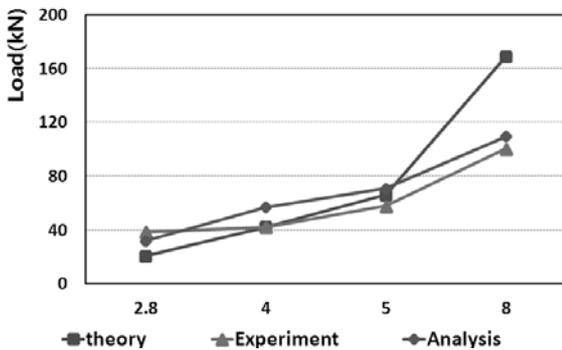
특히 면외저항판이 8mm인 실험체의 경우에는 실험과 유한요소해석에서 알 수 있듯이 면외저항판의 파괴가 발생하기 이전에 강관이 축하중에 의해 국부변형이 발생하여 종국하중에 도달하기 때문으로 판단된다.

TS-4에서는 실험값과 해석치의 항복하중 상대차가 크게 나타나는데 이는 실험체의 파괴양상에서 알 수 있듯이 실험체 용접부의 조기 파단으로 내력의 차이가 크게 발생하고 있다.

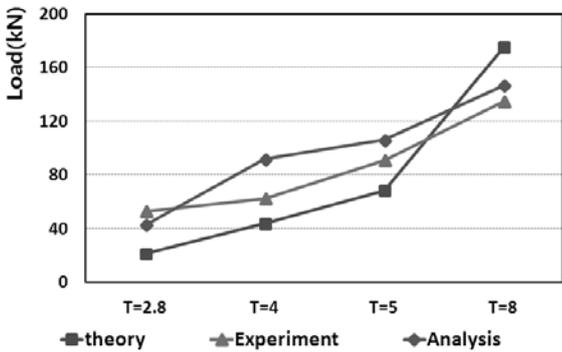
Fig. 12에서는 각실험체의 항복하중을 비교하여 나타낸다.

Table 5. Yield load

Type	Yield line (kN)	Experiment (kN)	Analysis (kN)	Anal / Exp (%)	
TP	2.8	20.7	38.7	31.7	82.0
	4	42.3	42.2	57.0	135.1
	5	66.1	57.9	70.8	122.3
	8	169.3	100.4	109.5	109.1
TS	2.8	21.4	53.1	43.1	81.2
	4	43.8	62.5	91.9	147.1
	5	68.4	90.5	106.1	117.2
	8	175.1	134.6	146.7	109.1



(a) TP type



(b) TS type

Fig. 12 Yield strength

6. 결 론

본 연구에서는 세장한 철골부재에 압축력이 작용할 때, 부재의 좌굴 전에 항복하도록 유도하는 장치를 제안하여 실험과 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) TP 실험체의 경우에는 면외저항판의 두께가 얇을수록 조기에 항복한 후 강도 재상승의 경향을 나타내고 있다.
- (2) TS 실험체의 경우에는 TP 실험체에 비해 높은 항복강도를 나타내고 있으며, 항복후 내력의 저하가 크게 발생하고 있다.

- (3) TP 실험체의 경우에는 최대 변위가 10mm 전후로서 용접부의 회전이 0.1rad.까지 변위가 발생한 이후 파단되고 있으나, TS 실험체의 경우에는 30°경사에 해당하는 만큼의 변형증대가 발생하고 있다.
- (4) 면외저항판을 이용한 응력제한 장치는 항복 후 소성영역에서 안정된 이력거동을 나타내고 있어 응력제한방식으로서 유효성이 확인되었으며, 향후 실 구조물에 적용이 가능하리라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임.(No. 2012-0008301)

이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌(References)

- [1] 박만우, 주영규, 김명환, 김지영, 김상대(2008) 고강도강 비좌굴 가새의 구조성능 평가, 한국강구조학회 논문집, 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, 한국강구조학회 논문집, 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] 박준희, 김진구(2008) 각형강봉으로 충전된 좌굴방지 가새의 반복하중실험, 대한건축학회 논문집, 대한건축학회, 제24권, 제10호, pp.53-60.
Park, J.H. and Kim, J.K. (2008) Cyclic Test of Buckling Brace Filled with Square Bars, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 24, No. 10, pp.53-60 (in Korean).

- [4] Parke, G.A.R. (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.
- [6] Tada, M. (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] 김철환, 채원탁, 오영석(2012) 좌굴전 항복유도 장치의 개발(1), 2012년도 학술대회 발표집, 한국강구조학회, pp.91-92.
Kim, C.H, Chae, W.T., and Oh, Y.S. (2012), Development of force limiting devices which induce yielding before buckling(1), *Proceedings of Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.91-92 (in Korean).
- [8] Watanabe, A., Hitomoi, Y., Saeki, E., Wada, A., and Fujimoto, M. (1988) Properties of Brace Encased in Buckling-Restraining Concrete and Steel Tube, *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan. Vol. IV, pp.719-724.
- [9] Hanaor, A, Schmidt, L.C. (1980) Space truss studies with force limiting devices. *Journal Struct Div*, ASCE, Vol. 106, No. 11, pp.2313-2329.
- [10] Mansfield, E.H. (1957) Studies in collapse analysis of rigid-plate with square yield diagram, *Proceedings of Royal Society London*, 241, Series A, pp.311-338, UK.

요 약: 세장한 부재에 압축력이 작용할 때, 부재는 탄성좌굴이 발생하게 되어 급격히 내하력을 상실하고 파괴에 도달하게 된다. 이러한 현상으로 인한 부재의 파괴는 종국적으로 구조체에 위해를 가하게 되어 붕괴원인이 되기도 한다. 본 연구에서는 세장한 부재에 압축력이 작용할 경우 부재가 탄성좌굴이 발생하기 이전에 항복하도록 유도하는 장치(응력제한장치)를 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 특히, 본 논문에서는 응력제한장치로서 면외저항판 방식을 제안하고 실험과 유한요소 해석을 수행하였다. 실험의 변수는 면외저항판의 두께 및 저항판의 경사도이다. 실험 및 해석결과 면외저항판 실험체는 항복후 소성영역에서 내력의 큰 저하없이 안정적인 거동을 나타내고 있어 응력제한방식으로서 유효성이 확인되었다.

핵심 용어: 응력제한장치, 면외저항, 하중-변위관계, 파괴형상, 항복선이론