

단면절삭형 응력제한 장치의 개발에 관한 연구

김철환¹ · 채원탁^{2*}

¹교수, 경북대학교, 건축토목공학부, ²박사과정, 경북대학교, 대학원

A Study on the Development of Force Limiting Devices of Cross-Section Cutting Types

Kim, Cheol Hwan¹, Chae, Won Tak^{2*}

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

²Doctoral Course, Graduate School, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

Abstract - This paper describes the development of force limiting device(FLD). The FLD could induce compressive yield before occurring elastic buckling for slender member under compressive load. Therefore, it might prevent reduction of load carrying capacity by elastic buckling and the structures with the devices would behave stable. A new type of FLD reduced cross area is proposed in this study different to existing studies like as out of plane type, slit type and folded plate type. The parameters of specimens are depth, width and number of cutting. The structural capacity and characteristics of proposed types were verified by experiment and FEM analysis. The FLD of cutting type is efficient in compressive member.

Keywords - Force limiting device, Cross-section cutting, Load-displacement relationship, Failure mode, Strength

1. 서론

세장한 부재가 압축력을 받을 경우, 발생하는 횡좌굴에 의한 내력의 저하는 구조물의 지지능력을 상실하게 하여 종국적으로 구조물의 손상을 야기시키게 된다. 따라서, 압축을 받는 구조물은 작용하중에 대해 좌굴이 발생하지 않고 안정적으로 거동하도록 조치할 필요가 있다.

이러한 조치의 일환으로 압축을 받는 부재가 일정한 하중에 도달하였을 경우, 항복이 발생하도록 하여 횡좌굴을 방지하고 구조물이 안정적으로 변형하여 높은 에너지 흡수능력을 가지도록 하는 장치로서 응력제한기구(force limiting device: FLD)의 개발이 진행되고 있다. FLD는 특정 부분에

대해 응력을 제한하여 항복을 유도하는 장치로서, 좌굴이 발생하는 위치의 단면을 확대하여 좌굴을 방지하는 비좌굴 가새^{[1],[2]} 등과는 차이가 있다. 이러한 FLD의 연구는 국외에서는 Schmidt *et al.*에 의해 대공간 트러스 구조물에서 시공오차를 흡수하기 목적으로 연구^{[3],[4]}가 진행되어 왔으며, Parke(1988)에 의해 브레이스 등과 같은 부재에 대해 응력을 제어하기 위해 재료의 변형방식과 마찰에 의한 방식 및 유압에 의한 방식 등의 연구^[5]가 진행되어 왔으며, 현재까지 부재를 2중강관부재로 제작하여 부재의 좌굴안정성에 대한 연구^[6]가 지속적으로 진행되고 있다.

한편, 국내에서는 이진 등(2009)은 채널 형상을 이용한 비좌굴 Knee Bracing System의 내진성능에 대한 실험적 연구^[7]를 진행하였으며, 김상대 등(2010)은 Diagrid 시스템을 이용하여 외부튜브를 이루는 가새와 이를 연결하는 거더의 스트럿-타이 거동에 의해 수직 및 수평하중에 대해 저항하는 실험적 연구^[8]를 진행하였다. 김철환 등(2013)에 의해 다양한 형태의 FLD에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이들의 연구에서는 재료의 변형에 의해 에너지를 흡수하는 구조 형식으로 개발되어 왔다. Fig. 1(a)에서와 같이 재료의 면외 변

Note.-Discussion open until August 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 14, 2014; revised December 8, 2014; approved on December 29, 2014.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-54-530-1374 Fax. +82-54-530-1379

E-mail. cwtak@hanmail.net

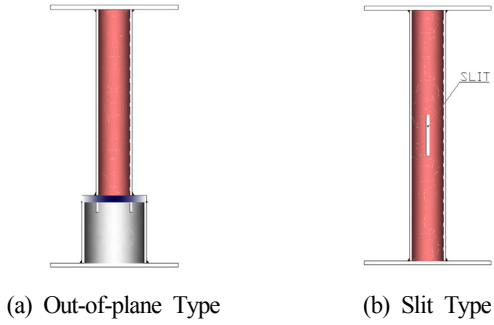


Fig. 1. Method of FLD

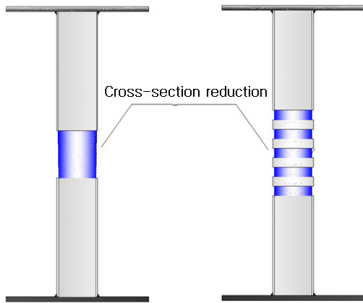


Fig. 2. Proposed FLD

형에 의한 형식^[9]과 Fig. 1(b)에서와 같이 강관의 일정부분에 대해 슬롯을 만들어 폐단면을 개단면화 함으로서 내하 능력을 감소시켜 작용하중을 제어하는 방식^[10] 등이 사용되었다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 압축재의 단부의 특정부위를 절삭하여 단면적을 감소시킴에 따라 건전한 부위에 비해 초기에 항복하도록 유도한 기구의 개발 및 실용화를 목표로 시공성, 경제성, 유지관리의 편리 등이 뛰어난 단면 절삭형 응력제한 장치를 제안하고 기구의 구조적 성능과 특성을 실험적 해석적으로 규명하여 응력제한 기구의 유효성을 검증하는 것을 그 목적으로 하고 있다.

2. 실험 계획

2.1 응력제한 장치 및 부재 계획

전술한 바와 같이 본 연구에서는 응력제한 방식 중 재료변형 방식의 단면 절삭형 FLD를 제안하고 실험체를 계획하였으며, Table 1에서는 응력제한 장치(FLD) 및 부재의 실험체 계획을 나타낸다.

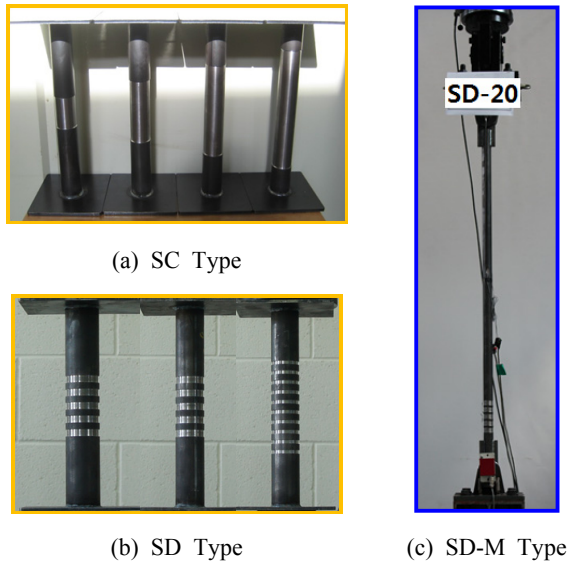
실험체 계획은 FLD 장치부와 FLD를 장착한 부재로 크게 2가지로 나누어 제작하였다. 또한 FLD 장치부는 단면을 연

Table 1. Test specimens

| No | Name | Method of FLD | | Shape |
|----|------|------------------|----------|-------|
| | | Type | Standard | |
| 1 | SC | Cutting | 50mm | |
| | | | 100mm | |
| | | | 150mm | |
| | | | 200mm | |
| 2 | SD | Segments Cutting | 5 | |
| | | | 5T | |
| | | | 10 | |
| 3 | SD-M | Member | 2.0 | |
| | | | 2.4 | |
| | | | 20 | |
| | | | 25 | |
| | | | 30 | |

속 절삭한 SC Type과 분절 절삭한 SD Type으로 나누어 제작하였다. 실험체 제작에 사용된 강재는 모두 SS400급 강재를 사용하였으며, FLD 실험체는 높이 300mm의 $\phi 42.7 \times 2.9$ 원형강관의 외부를 절삭하여 제작하였으며, 부재실험체 계획은 부재의 전체길이는 $l=1,600$ mm, 순 길이는 $l=1,500$ mm, 부재는 원형강관 $\phi 42.7 \times 2.9$ 를 사용하였으며, 부재하단부에 FLD를 부착하였다.

FLD 실험체에서 SC Type은 절삭깊이는 1mm로 고정하고 절삭깊이를 50~200mm으로 계획하였다. SD Type에서 5, 10 Type은 절삭깊이는 1.7mm로 하고 분절개수를 5EA, 10EA로 산정하였으며, 5T Type은 분절개수는 5EA로 하고 절삭깊이를 각 분절마다 1.3mm~1.7mm로 계획하였다. 절



(a) SC Type

(b) SD Type

(c) SD-M Type

Fig. 3. Shape of FLD & Member

삭단면 중앙을 기점으로 중앙부 1EA의 절삭깊이는 1.7mm, 다음 상·하단 2EA의 절삭깊이는 1.5mm, 외단부 2EA의 절삭깊이는 1.3mm로 계획하여 압축하중에 의해 중앙부 절삭단면에서부터 외단으로 변형이 일어나도록 계획하였다. SD Type에서의 절삭폭은 5, 5T Type은 모두 10mm, 10 Type은 5mm로 산정하였으며, 각 절삭폭 사이의 분절폭은 10mm로 계획하였다. 또한, FLD 실험체에서 대해서는 유한요소 해석을 동시에 수행하였다.

부재 실험체인 SD-M Type에서 2.0, 2.4 Type에서는 절삭폭은 10mm로 고정하고 절삭깊이를 1.0mm, 1.2mm로 계획하였으며, 20, 25, 30 Type에서는 절삭깊이는 1.2mm로 하고, 절삭폭을 20~30mm로 계획하였다. 또한 각 절삭된

분절사이의 폭은 모두 10mm로 계획하였다.

부재에 장착된 FLD 내부에는 편심하중 등을 고려하여 강봉(Guide bar)을 설치하였다.

Fig. 3에서는 FLD 및 부재 실험체의 형상을 나타낸다.

2.2 실험체 설치 및 측정방법

FLD 실험체에 대한 실험은 용량 600kN의 만능재료시험기(UTM)에 실험체를 설치하여 압축실험을 실시하였으며, 하중, 변위, 거동 등의 실험결과를 취득하였다.

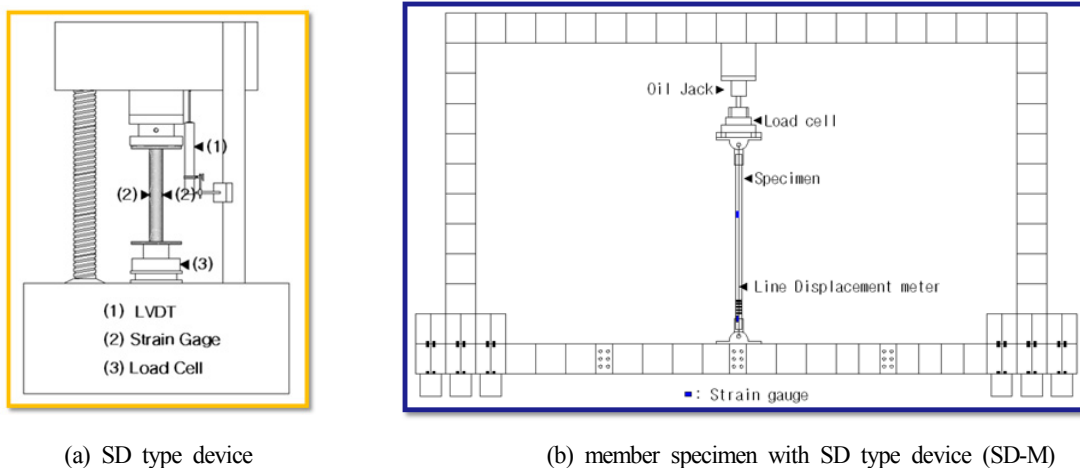
FLD 부재에 대한 실험은 구조프레임에 실험체를 설치하고 하중, 변위, 거동 등의 정확한 실험결과를 취득하기 위해 별도로 로드셀과 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였으며, 실험체의 변형율을 판단하기 위하여 중앙부에 축방향으로 스트레인게이지를 부착하였다.

실험의 진행은 파괴를 상정하여 절삭단면이 압축하중에 의해 압괴, 파괴 및 변형이 발생할 때까지 변위제어를 하였다. 변위제어속도는 2mm/min으로 하였다. Fig. 4는 FLD 및 부재 실험체의 설치상황을 나타낸다.

2.3 재료시험

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

FLD 실험체 및 부재에 사용된 $\varnothing 42.7 \times 2.9$ 원형강관에서 3개의 인장시편을 제작하여 재료시험을 수행하였다. 재료시험은 한국공업규격의 금속재료 인장시험편(KS B 0801)에 따라 제작하였으며, KS B 0802에서 규정하는 실험방법에



(a) SD type device

(b) member specimen with SD type device (SD-M)

Fig. 4. Set-up of specimen

Table 2. 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% |

준하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 강재의 기계적 특성은 Table 2에 나타낸다. SS400급 강재를 사용하였으나, 실제로는 보다 높은 항복강도와 항복비를 나타내고 있다.

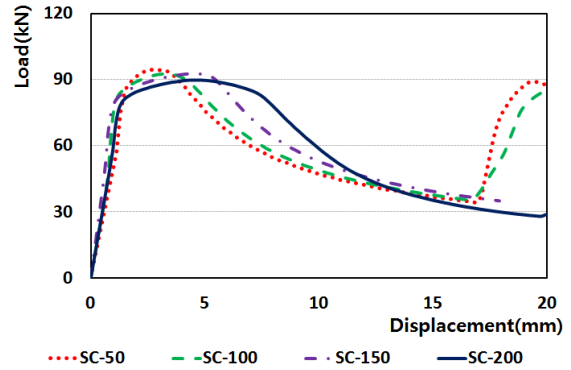
3. 실험결과 및 고찰

3.1 하중-변위관계

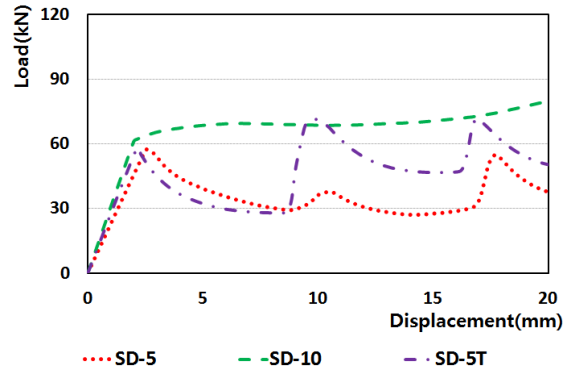
Fig. 5에서는 FLD 실험체 및 부재 실험체에 대한 각 Type 별 하중-변위관계 곡선을 나타내고 있다. Fig. 5(a)의 FLD 실험체에서 연속절삭방식의 SC Type은 절삭길이에 관계없이 모두 유사한 거동을 나타내고 있으며, 변위 2mm를 전후하여 탄성한계에서 소성영역구간으로 진행하며 항복하중과 최대하중을 나타낸다. 각 Type에서의 최대하중은 약 90kN 정도 나타나며, 최대하중 이후 일정 변위에서 안정적인 거동을 나타내다가 변위가 증가할수록 서서히 하중의 감소가 나타난다. SC 50, 100 Type에서는 변위 17mm를 전후하여 다시 하중이 약 90kN까지 상승하는 추세를 나타낸다. 이는 절삭단면 상하단부에서 압괴로 인한 주름이 발생하여 다시 하중 증가가 나타나면서 웨이브형태의 곡선을 나타내고 있다. FLD 실험체 중 Fig. 5(b)의 분절절삭방식인 SD Type에서는 분절개수가 5EA인 5, 5T Type은 유사한 웨이브 형태의 거동을 나타내고 있으며, 절삭깊이가 1.7mm로 균일한 SD-5 Type이 절삭깊이가 1.3mm~1.7mm인 SD-5T Type 보다 웨이브의 폭이 상대적으로 낮게 나타났다.

5T Type에서 중앙부 절삭깊이가 1.7mm로 약 8mm 변위까지는 5 Type과 유사한 거동을 나타내고 있으며, 절삭깊이가 1.5mm로 증가하는 변위 10mm에서 하중은 약 70kN까지 증가한다. 절삭깊이가 1.7mm로 균일하고, 절삭폭이 10mm인 5, 5T Type 보다 5mm로 산정한 SD-10 Type은 항복 이후 소성구간에서 안정적인 거동을 나타낸다.

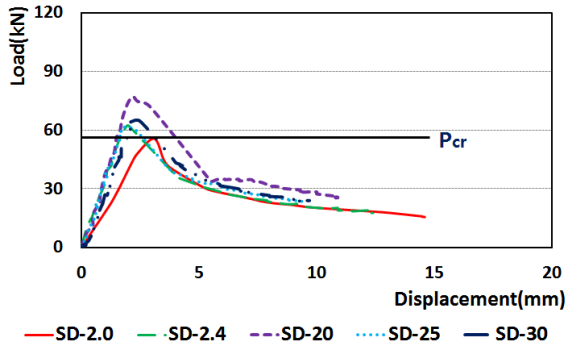
Fig. 5(c)는 FLD를 부착한 부재인 SD-M Type에 대한 하중-변위관계 곡선을 나타내고 있다. 5 Type 모두 유사한 거동을 나타내고 있으며, 절삭깊이가 1.2mm로 일정하고, 절



(a) SC type



(b) SD type



(c) SD-M type

Fig. 5. Load-displacement relationship(Experiment)

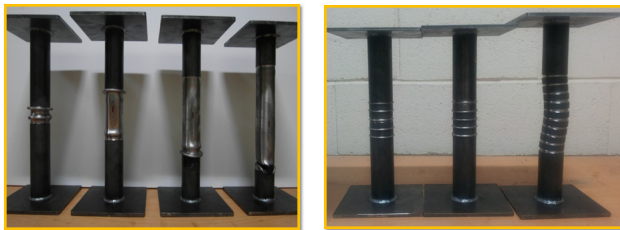
삭폭이 20mm인 SD-20 Type에서 최대하중 및 항복하중을 나타내고 있으며, 최대하중은 약 77kN으로 나타났다.

절삭깊이가 1.0mm이고, 절삭폭이 10mm인 SD-2.0 Type이 이론적으로 가장 높은 하중값을 나타내야 하지만 가장 낮은 55kN의 하중값을 나타내고 있다. 이는 실험체 제작상의 오차, 편심하중 등에 기인된 것으로 판단된다. SD-2.4, 25, 30 Type들은 모두 유사한 거동형태를 보이며, 최대하중은 약 65kN으로 나타났다.

SD-M Type 모두 항복하중 이후 소성구간에서 안정적인 거동을 나타내지 않고 하중감소가 나타나고 있다.

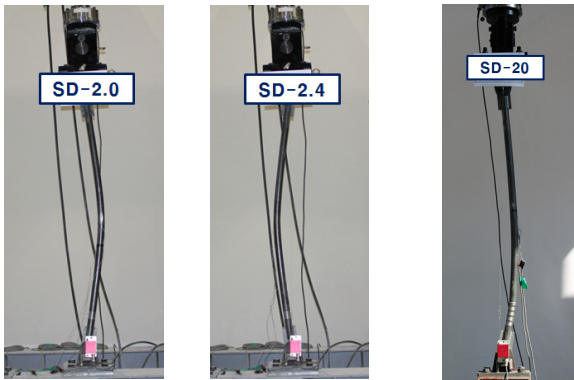
3.2 파괴양상

Fig. 6에서는 각 Type별 실험체의 파괴양상을 나타낸다. FLD 실험체의 SC-50, 100 Type에서는 절삭된 양단부에서 압괴에 의한 주름이 발생하였으며, SC-150, 200 Type에서는 절삭 하단부에서 압괴에 의한 주름과 형상변형이 발생하였다. SD Type에서는 절삭된 단면부위에서 변형이 발생하였으며, SD-10 Type 중앙부에서는 편심하중 등에 의한 휨변형도 함께 나타났다.



(a) SC type

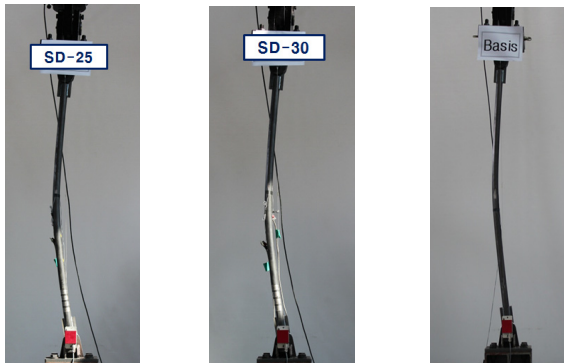
(b) SD type



(c) SD-M-2.0 type

(d) SD-M-2.4 type

(e) SD-M-20 type



(f) SD-M-25 type

(g) SD-M-30 type

(h) Basic type

Fig. 6. Failure modes

부재 실험체인 SD-M Type들은 모두 부재에서 탄성좌굴이 발생하였다. $\phi 42.7 \times 2.9$ 부재 실험체의 단면에서 1.0~1.2mm를 절삭하여 순 단면 두께는 1.7~1.9mm으로 이론적인 FLD부의 항복하중은 41.5kN~46.2kN이지만, SD-M Type 부재 실험체들의 항복하중은 개략 55kN~70kN 내에서 형성되었다. 이는 실험체 제작상의 오차, 편심하중, 부재 FLD 내부에 장착된 Guide bar와 실험체와의 밀착으로 인한 강도상승 등의 영향으로 판단된다.

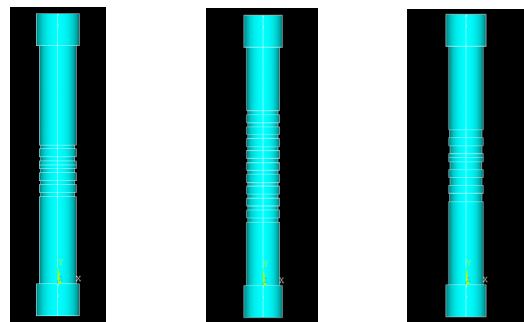
Fig. 6(h)는 기본부재의 압축하중에 의한 탄성좌굴을 보여주고 있으며, 좌굴하중은 57kN으로 나타났다.

4. 유한요소해석

4.1 해석 모델

FLD 각 실험체에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 S/W는 범용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 비선형 해석 및 소성좌굴해석이 가능한 ANSYS 12.1을 사용하였다. SD type은 5, 10, 5T Type으로 구분하였으며, 변수로는 5, 10 Type의 절삭깊이는 1.7mm, 절삭폭은 SD-5 Type은 10mm, 10 Type은 5mm, 분절개수는 5EA 및 10EA로 하였다. 5T Type은 절삭깊이는 1.3~1.7mm, 절삭폭은 10mm로 하였으며, 모든 실험체의 각 분절사이 절삭되지 않은 부분의 폭은 5mm로 하였다. 이와 같이 모델링을 하여 하단은 UX, UY, UZ 방향을 구속하였고 상단은 UX, UY 방향을 구속하였다. 또한 변위제어방식을 이용하여 상단의 변위를 UY 방향으로 20mm씩 변위를 주어 해석을 수행하였다.

Fig. 7은 SD Type에 대한 해석 모델링을 나타낸다.



(a) SD-5 type

(b) SD-10 type

(c) SD-5T type

Fig. 7. Analysis modeling

4.2 응력분포 현황

Fig. 8은 각 해석모델링의 응력분포 상태를 나타낸다.

SC-50, 100 Type에서는 절삭단면 중앙부에서 압축하중에 의한 주름이 발생하였으며, 이 부분에서 응력 집중현상이 나타났다. SC-150 Type에서는 절삭단면에 중앙부 및 양단부에서 3EA의 주름이 균등하게 발생하였으며, 중앙부에서 응력분포가 넓고 높게 나타났으며, SC-200 Type 절삭단면 양단부에 압축에 의한 주름 및 변형이 발생하고 높은 응력상태를 나타낸다.

SD-5, 10 Type에서는 각 절삭된 단면부에 거의 균일한 응력분포와 변형이 나타나며, 절삭깊이를 다르게 한 SD-5T Type에서는 절삭깊이가 가장 큰 중앙부 절삭단면에서 최대 응력 및 변형이 나타났다.

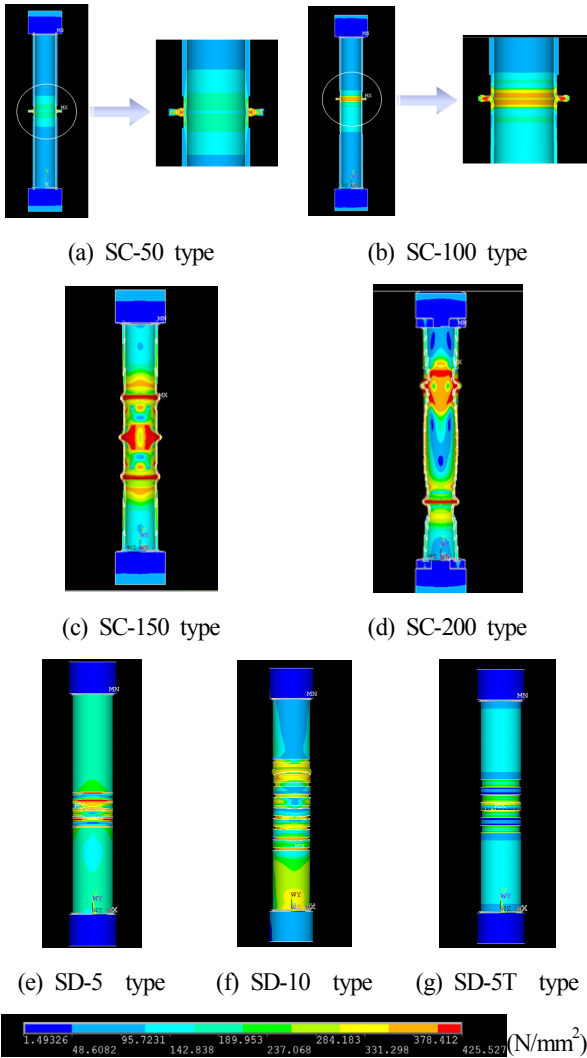


Fig. 8. Stress distribution (Analysis)

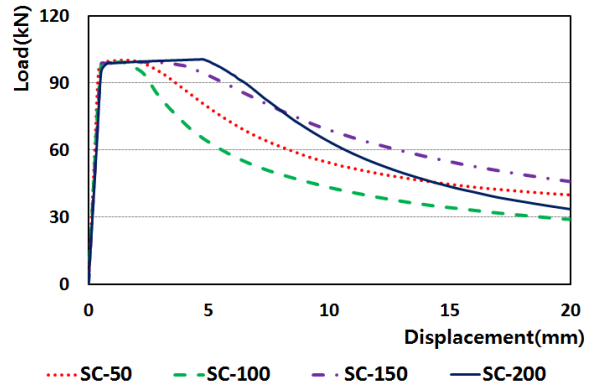
4.3 해석 결과

해석결과는 Fig. 9 및 Table 3에 나타낸다. Fig. 9는 각 해석 모델의 하중-변위 관계를 나타내고 있다.

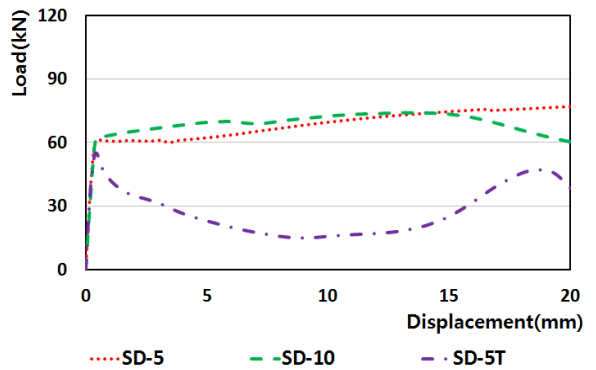
Fig. 9(a)는 SC Type에 대한 하중-변위관계 곡선을 나타내며, 모든 Type에서 유사한 거동형태를 나타내고 있으며, 최대하중 및 항복하중 또한 유사한 값을 나타낸다. 항복이후 소성구간에서 모든 실험체가 일정변위 이상 안정적인 거동을 나타내지만, SC-100 Type은 변위 2.5mm부터 가장 빨리 변위증가에 따른 하중감소가 나타난다. SC-200 Type은 항복이후 안정적인 거동을 유지하다가 변위 5mm 이후부터 서서히 하중감소가 나타난다.

SD-5 및 10 Type은 유사한 거동형태를 나타내며, 항복 이후 다소 하중증감은 있지만 소성영역에서 모두 안정적인 거동을 나타낸다. 위 결과로 절삭단면의 폭과 분절개수의 영향은 미미한 것으로 판단된다.

SD-5T Type에서는 항복이후 완전한 하중감소가 나타나며, 변위 10mm 이후 다시 하중이 증가하며, 변위 18mm 이



(a) SC type



(b) SD type

Fig. 9. Load-displacement relationship (Analysis)

Table 3. Maximum Stress & Yield Load(Analysis)

| Type | | Maxium stress (N/mm ²) | Yield load (kN) |
|------|-----|------------------------------------|-----------------|
| SC | 50 | 432.2 | 98.2 |
| | 100 | 428.8 | 98.3 |
| | 150 | 429.2 | 98.6 |
| | 200 | 433.5 | 97.7 |
| SD | 5 | 526.5 | 59.9 |
| | 10 | 549.4 | 62.5 |
| | 5T | 381.6 | 53.2 |

후 하중감소 현상을 나타낸다.

SC Type에서의 최대응력은 약 430N/mm²이며, 항복하중은 개략 98kN으로 모든 Type에서 유사한 결과값을 나타내고 있다.

SD Type에서는 SD-10 Type이 가장 높은 응력과 항복하중값을 나타내고 있으며, 최대응력은 549.4N/mm²이며, 항복하중은 약 62.5kN으로 나타났다. SD-5 Type의 최대응력은 526.5N/mm²이며, 항복하중은 약 60kN이다.

SD-5T Type은 가장 낮은 응력과 항복하중을 나타낸다.

Table 3에서는 각 해석실험체의 최대응력 및 항복하중을 나타내고 있다.

4.4 실험 및 해석결과의 비교

Table 4 및 Fig. 10~11에서는 FLD 각 실험체의 이론 및 실험결과, 수치해석의 최대응력 및 항복하중의 비교를 나타낸다.

Table 4의 이론적인 수치는 Table 2에 나타난 사용재료의 항복강도를 이용하여 $\sigma = \frac{P}{A}$ 로 구하였다.

SC Type의 수치해석 결과에서 절삭폭에 따른 영향은 나

Table 4. Yield load

| Type | | Theory (kN) | Experiment (kN) | Analysis (kN) |
|------|-----|-------------|-----------------|---------------|
| SC | 50 | 46.23 | 92.2 | 98.2 |
| | 100 | 46.23 | 86.5 | 98.3 |
| | 150 | 46.23 | 82.9 | 98.6 |
| | 200 | 46.23 | 81.6 | 97.7 |
| SD | 5 | 29.44 | 56.6 | 59.9 |
| | 10 | 29.44 | 61.7 | 62.5 |
| | 5T | 29.44 | 57.6 | 53.2 |

타나지 않으며, 항복하중은 모든 Type에서 약 98kN으로 나타났다. 실험결과에서의 항복하중은 81.6~92.2kN으로 해석치와 약 6~20% 정도 차이를 나타내며, 절삭폭이 길어질수록 항복하중의 감소가 나타났다. 이는 실험체 제작상의 오차, 편심하중 등의 영향으로 판단된다.

SD Type에서의 항복하중은 실험치와 해석결과가 모두 5% 범위 내외에서 유사하게 나타났다. 실험 및 해석치에서 SD-10 Type이 가장 높은 항복하중값을 나타냈다. 이론적 항복 하중치 보다 실험 및 수치해석의 항복하중은 약 2배 정도 높게 나타났다. 이는 압축하중에 의한 FLD 실험체 단면 절삭부에서의 압괴, 변형(주름)이 중첩 및 증가되면서 강도가 높게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 10에서는 각 Type별 이론, 실험 및 수치해석상의 항복하중의 비교를 나타낸다.

Fig. 11은 실험 및 수치해석의 최대응력의 비교를 나타낸다.

SC Type에서의 최대응력은 실험 및 해석결과 모두 유사

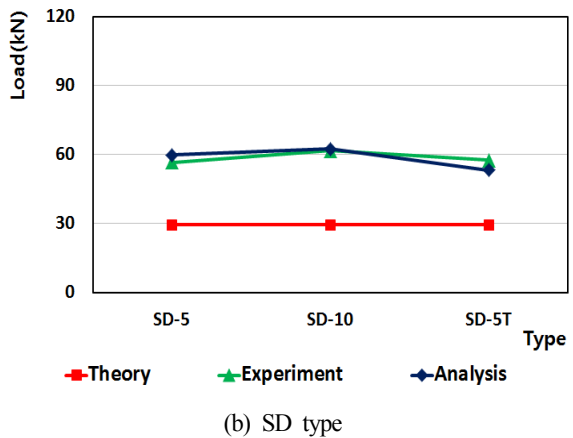
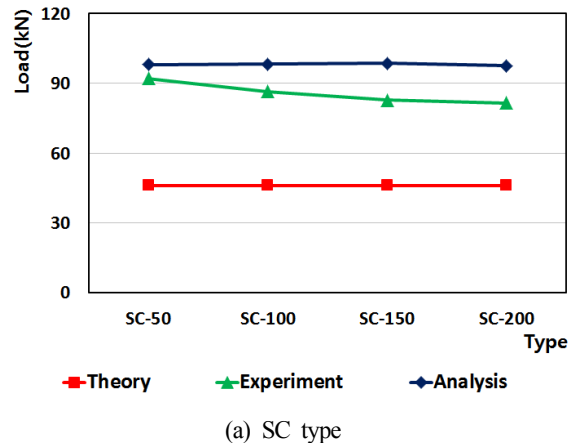
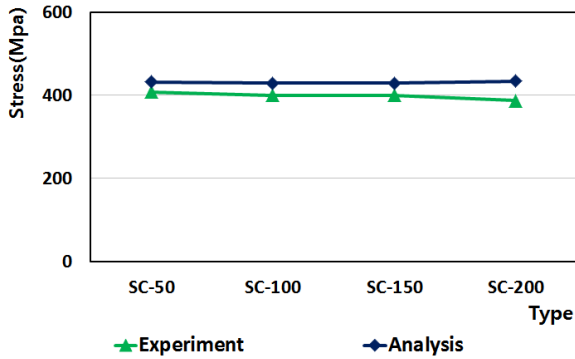
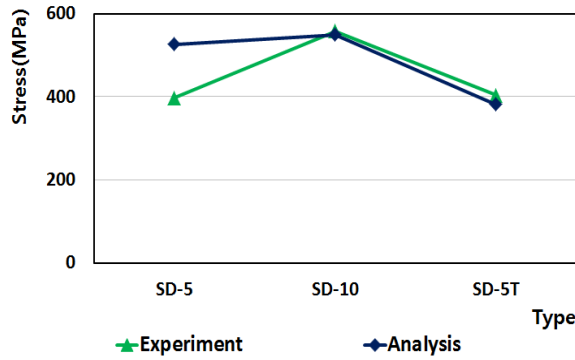


Fig. 10. Yield load



(a) SC type



(b) SD type

Fig. 11. Maximum stress

하게 나타나며, 응력은 약 390~430N/mm² 범위에 있다.

SD Type에서 실험치의 최대응력은 SD-10 Type에서 약 560N/mm²으로 가장 높게 나타났다.

5. 결론

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

- (1) FLD 실험체에서 단면 폭의 변수를 가진 SC Type의 경우 모든 Type에서 유사한 거동형태를 나타내고 있어 단면 절삭 폭의 영향은 나타나지 않는다.
- (2) SD Type에서는 항복이후 소성영역에서 안정적인 거동을 나타내고 있으며, 단면 절삭 폭을 좁게, 절삭개수가 많을수록 소성영역에서 보다 안정적인 거동을 나타내고 있다.
- (3) 부재 실험체인 SD-M Type의 경우, FLD부의 변형 이

전에 부재에서의 탄성좌굴이 발생하였다. 이는 편심하중, 부재 제작상의 오차, 내부 Guide bar, 부재의 탄성좌굴 등의 영향으로 판단되며, 금후 부재의 탄성좌굴하중에 대한 검토가 필요하다.

- (4) 단면절삭을 이용한 응력제한 장치는 항복 후 안정된 이력거동을 나타내고 있어 FLD로서 그 유효성이 확인되었다.

추후 부재와 응력제한 장치의 접합부 성능을 개선하여 부재에 변형 및 파괴가 발생하지 않고, 응력제한 기구만을 교체하여 반복 사용할 수 있도록 시공성, 경제성을 높여 실 구조물의 적용이 가능하리라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임.(No. 2011-0024207)

참고문헌(References)

- [1] Inoue, K., Sawaizumi, S., and Higashibata, Y. (2001) Stiffening Requirements for Unbonded Braces Encased in Concrete Panels, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.127, No.6, pp.712-719.
- [2] Ding, Y., Zhang, Y., and Zhao, J. (2014) Cyclic Tests of Unbonded Steel Plate Brace Encased in Steel-Concrete Composite Panel, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.102, pp.233-244.
- [3] 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.
- [4] Hanaor, A. and Schmidt, L.C. (1980) Space Truss Studies with Force Limiting Devices. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.106, No.11, pp.2313-2329.
- [5] 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.
- [6] Parke, G.A.R. (1993) A Novel Soft Member for Space Trusses. Fourth Int Conf Space Struct. Surrey, UK, 1993, pp.116-126.

- [7] 이진, 이기학, 이한선, 김희철, 이영학(2009) 채널 형강을 이용한 비좌굴 Knee Bracing System의 내진성능에 대한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제1호, pp.71-81.
Lee, J., Lee, K.H., Lee, H.S., Kim, H.C., and Lee, Y.H. (2009) Experimental Study on Buckling Restrained Knee Bracing Systems using Channel Sections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.1, pp.71-81 (in Korean).
- [8] 이종혁, 주영규, 김영주, 김상대(2010) Diagrid BRB의 실험적 구조성능 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제3호, pp.261-269.
Lee, J.H., Ju, Y.K., Kim, Y.J. Kim, S.D. (2010) Experimental Evaluation for Structural Performance of Diagrid BRB Structural System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.3, pp.261-269 (in Korean).
- [9] 김철환, 채원탁, 오영석, 김채영(2013) 좌굴전 항복유도 장치(FLD) 개발에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.279-287.
Kim, C.H., Chae, W.T., Oh, Y.S., Kim, C.Y. (2013) A Study on the Development of Force Limiting Devices (FLD) which Induce Yielding Elastic Buckling, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.279-287 (in Korean).
- [10] 오영석, 김철환, 김채영, 채원탁(2013) 슬릿형 응력제한장치(FLD)의 좌굴 후 거동에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제5호, pp.475-486.
Oh, Y.S. Kim, C.H., Kim, C.Y., and Chae, W.T. (2013) A Study on the Post-buckling Behavior of Slit Type FLD (Force Limiting Device), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.5, pp.475-486 (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 세장한 부재가 압축력을 받을 경우 발생하는 횡좌굴에 의한 내력의 저하를 방지하기 위해, 좌굴 전에 항복을 유도하는 응력제한장치의 개발에 관한 것으로서, 기존의 면외저항방식 및 슬릿방식과는 상이한 단면절삭방식을 제안하고 그 유효성을 실험적, 해석적으로 규명하고 있다. 단면절삭방식은 단면의 절삭범위에 따라 역학적 특성 및 구조적 성능이 상이한 것으로서, 연구의 대상은 절삭의 폭 및 절삭개수를 주 대상으로 하고 있다. 연구결과, 단면 깊이가 같은 경우 단면 절삭폭의 영향은 나타나지 않았으며, 단면 절삭폭을 좁게, 절삭개수가 많을수록 소성영역에서 좀 더 안정적인 거동을 나타내었다. 따라서, 단면절삭을 이용한 응력제한 장치는 항복 후 안정된 이력거동을 나타내고 있어 응력제한 장치로서 그 유효성이 확인되었으며, 향후 실 구조물에의 적용이 가능하리라 판단된다.

핵심용어 : 응력제한장치, 단면절삭형식, 하중-변위관계, 파괴모드, 최대강도
