



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

냉간성형강 압축재의 중심압축실험을  
통한 설계조항 적합성 검토

Evaluating the Performance of Cold-Formed  
Members under Central Axial Compression

蔚山大學校 大學院  
建築學科  
朴相寓



냉간성형강 압축재의 중심압축실험을  
통한 설계조항 적합성 검토

Evaluating the Performance of Cold-Formed  
Members under Central Axial Compression

指導教授 金大敬

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함


2024 年 02 月


蔚山大學校 大學院


建築學科

朴相寓

朴相寓의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員 임명관 (인) 

審査委員 손기영 (인) 

審査委員 김대경 (인) 

蔚山大學校 大學院

2024年 2月

## 국문 요약

얇은 판을 가공하여 단면을 구성하는 냉간성형강 압축부재는 전체 좌굴과 함께 국부좌굴 또는 뒤틀림좌굴이 혼합되어 나타나므로 이에 대한 면밀한 안정성 검토가 요구된다.

이 논문에서는 최근 개정된 냉간성형강 설계기준에 대한 국내의 박판 냉간성형강 소재의 적합여부와 압축재로서의 성능 만족여부를 확인하고자 하였다. 공칭항복강도 275 MPa 급의 일반강재와 항복강도 420 MPa 급의 고강도강재를 선정하여 냉간단조성형으로 압축재를 제작하고, 중심압축실험을 수행하여 기동세장비와 단면형상에 따른 좌굴거동을 확인하였다. 또한 실험 셋업에서 구현하지 못한 다양한 기동세장비에 따른 좌굴강도를 수치적으로 평가하기 위해 유한요소해석 모델을 구성하여 좌굴강도를 도출하였다. 또한 부재의 해석을 위해 해석 시간을 단축시킨 수정된 해석모델을 구성하고 앞선 해석 결과와 비교하여 적합성을 확인하였으며, 이를 통해 추가적인 유효좌굴길이를 가지는 부재의 좌굴강도를 도출하였다. 실험결과 및 해석결과를 통해 냉간성형강 설계기준에서 제시하는 적용사항을 검토하였다. 유효폭법과 직접강도법으로 산정한 강도는 중심압축실험강도보다 다소 보수적인 결과를 보였으나, 유한요소해석을 바탕으로 산정한 다양한 기동세장비의 강도와 비교할 경우 비교적 잘 부합함을 나타내었다. 열간성형강에 대한 설계기준인 강구조 부재 설계기준(KDS 14 31 10)으로 산정한 공칭압축강도는 중심압축실험결과 및 유한요소해석 결과와 비교할 시 매우 큰 편차를 보였으며, 냉간성형강의 좌굴강도에 대한 예측이 부정확함을 나타내었다.

실험적, 해석적 결과를 바탕으로 최근 개정된 냉간성형강 설계기준의 압축재 조항 적용적합성을 확인하였고, 열간성형강 설계기준을 적용하는 것이 부적절함을 입증하였다.

## <목 차>

국문요약 .....	i
목 차 .....	ii
표 목 차 .....	iv
그림목차 .....	v
I. 서 론 .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 선행연구 고찰 .....	2
1.3 연구방법 .....	2
II. 설계기준 분석 .....	4
2.1 냉간성형강 설계기준(KDS 41 30 30) 제정 .....	4
2.2 국외 설계기준 .....	7
2.2.1 Eurocode 3 .....	7
2.2.2 AISI Standard .....	7
2.3 설계 고려사항 .....	8
2.3.1 부재 설계에 대한 적용 한계 .....	8
2.3.2 연신율 제한 .....	9
2.3.3 냉간성형에 의한 항복강도 및 강도 증가 .....	10
III. 냉간성형 압축부재 설계과정 .....	12
3.1 항복 및 전체 좌굴강도 .....	12
3.2 항복 및 전체좌굴과 상호작용하는 국부좌굴강도 .....	14
3.2.1 유효폭법 .....	14
3.2.2 직접강도법 .....	16
3.3. 단면형상변형좌굴강도 .....	18

IV. 중심압축실험 .....	20
4.1 시편시험 .....	20
4.2 실험내용 .....	22
V. 유한요소해석 .....	35
5.1 해석모델 .....	35
5.1.1 해석모델 구성 .....	35
5.1.2 재료물성치 .....	37
5.1.3 초기불완전 .....	40
5.1.4 해석결과 .....	40
5.2 유한요소해석모델 수정 .....	45
5.2.1 단순화된 해석모델 구성 .....	45
5.2.2 재료물성치 단순화 .....	46
5.2.3 해석결과 .....	48
5.3 유한요소해석 결과 .....	53
VI. 설계기준 압축강도와 실험 및 해석결과 비교 .....	56
VII. 결  론 .....	63
참고문헌 .....	64
부    록 .....	66
A 공칭축강도 산정과정 예제(냉간성형강 구조설계기준: ASD) .....	66
B 공칭축강도 산정과정 예제(KDS 41 30 30) .....	69
C 예제 결과 비교 .....	75
D 횡변형 시작점 비교 .....	76
Abstract .....	78

## <표 목차>

표 2.1 국내 냉간성형강 설계기준 비교 .....	5
표 2.2 KDS 41 30 30 주요 강재 규격 .....	6
표 2.3 부재설계에 대한 적용 한계 .....	9
표 2.4 최소 연신율에 따른 적용 제한 .....	10
표 3.1 ㄷ단면의 플랜지와 끝단스티프너의 기하학적 물성치 .....	19
표 4.1 시편시험 결과 .....	20
표 4.2 중심압축실험 실험체 규격 및 결과 .....	23
표 5.1 유한요소해석 및 중심압축실험 결과 비교 .....	41
표 5.2 유한요소해석 삼선형 재료물성치 .....	48
표 5.3 유한요소해석(솔리드 해석모델, 셸 해석모델) 및 중심압축실험 결과 비교 .....	49
표 5.4 유한요소해석 결과(SSC275) .....	54
표 5.5 유한요소해석 결과(SPFH590) .....	55
표 6.1 중심압축실험 및 해석결과, 설계기준강도산정 결과비교 .....	58
표 6.2 해석결과(셸요소 해석모델) 및 설계강도산정 결과비교(SSC275- Lipped-C) .....	59
표 6.3 해석결과(셸요소 해석모델) 및 설계강도산정 결과비교(SSC275- C) .....	60
표 6.4 해석결과(셸요소 해석모델) 및 설계강도산정 결과비교(SPFH59 0) .....	61
표 A.1 예제 규격 .....	66
표 B.1 예제 규격 .....	69
표 B.2 KDS 41 30 30, 표 1.6-1 부재설계에 대한 적용 한계 검토 ..	69
표 C.1 예제 결과 비교 .....	75

## <그림 목차>

그림 2.1 EN 1993-1-3 설계 예시 .....	7
그림 4.1 시편시험 결과(응력-변형률 곡선) .....	21
그림 4.2 실험 구성 형태 .....	22
그림 4.3 실험체 좌굴형상(SSC275-Lipped-C-1.2mm) .....	24
그림 4.4 실험체 좌굴형상(SSC275-Lipped-C-1.8mm) .....	25
그림 4.5 실험체 좌굴형상(SSC275-C-1.2mm) .....	26
그림 4.6 실험체 좌굴형상(SSC275-C-1.8mm) .....	27
그림 4.7 실험체 좌굴형상(SPFH590-Lipped-C-1.8mm) .....	28
그림 4.8 실험체 좌굴형상(SPFH590-C-1.8mm) .....	29
그림 4.9 실험체 축하중-변형 및 횡변위 관계 (SSC275-Lipped-C) .....	30
그림 4.10 실험체 축하중-변형 및 횡변위 관계 (SSC275-C) .....	31
그림 4.11 실험체 축하중-변형 및 횡변위 관계 (SPFH590-Lipped-C) .....	32
그림 4.12 실험체 축하중-변형 및 횡변위 관계 (SPFH590-C) .....	33
그림 5.1 해석모델(실험체 1) .....	35
그림 5.2 솔리드요소(C3D20R) .....	36
그림 5.3 뒸-좌굴현상 .....	37
그림 5.4 냉간성형에 의한 재료물성치 변화 .....	38
그림 5.5 진응력-소성변형률 곡선 .....	39
그림 5.6 1차 좌굴모드(실험체 1) .....	40
그림 5.7 유한요소해석 및 중심압축실험 결과 비교(SSC275) .....	42
그림 5.8 유한요소해석 및 중심압축실험 결과 비교(SPFH590) .....	43
그림 5.9 유한요소해석 및 중심압축실험 결과 비교(좌굴형상) .....	44
그림 5.10 셸요소(S4R) .....	45
그림 5.11 수정된 해석모델(실험체 1) .....	46
그림 5.12 재료물성치 형태 .....	47
그림 5.13 입력된 비선형 재료물성치(인장강도 449.2 MPa, 입력값 약 2000행) .....	47
그림 5.14 삼선형 재료물성치 .....	48
그림 5.15 유한요소해석(수정 모델) 및 중심압축실험 결과 비교(SSC27	

5) .....	50
그림 5.16 유한요소해석(수정 모델) 및 중심압축실험 결과 비교(SPFH590) .....	51
그림 5.17 유한요소해석(기존, 수정 모델) 및 중심압축실험 결과 비교(좌굴형상) .....	52
.....	52
그림 6.1 최종결과비교(SSC275-Lipped-C) .....	62
그림 6.2 최종결과비교(SSC275-C) .....	62
그림 6.3 최종결과비교(SPFH590) .....	62
그림 D.1 횡변형 시작점 비교(SSC275-Lipped-C-1.2 mm) .....	76
그림 D.2 횡변형 시작점 비교(SSC275-Lipped-C-1.8 mm) .....	76
그림 D.3 횡변형 시작점 비교(SSC275-C-1.2 mm) .....	76
그림 D.4 횡변형 시작점 비교(SSC275-C-1.8 mm) .....	77
그림 D.5 횡변형 시작점 비교(SPFH590-Lipped-C-1.8 mm) .....	77
그림 D.6 횡변형 시작점 비교(SPFH590-C-1.8 mm) .....	77



# I. 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

매우 얇은 강판을 상온가공하여 단면을 구성하는 냉간성형강 압축부재는 국부 좌굴, 휨좌굴, 휨비틀림좌굴 및 뒤틀림좌굴이 혼합되어 나타나므로 이에 대한 면밀한 안정성 검토가 요구된다. 기존의 냉간성형강 부재 설계는 허용응력설계법에 기반하여 1999년도에 제정된 대한건축학회의 냉간성형강 구조설계기준(AIK: 1999)<sup>[1]</sup>을 따랐으나, 2022년에 한계상태설계법의 냉간성형강 설계기준(KDS 41 30 30: 2022)<sup>[2]</sup>이 새롭게 제정되어 국내의 냉간성형용 강재를 설계에 반영할 수 있게 되었다. 현 냉간성형강 설계기준(KDS 41 30 30)에 따르면, 강재의 최소 연신율이 10 % 이상이고 항복비가 93 % 이하일 경우에는 별도의 제한없이 설계기준을 적용할 수 있다. 연신율이 3 % 이상 10 % 미만인 냉간성형강은 재료강도를 90 %만 인정하는 패널티를 부여하며, 연신율이 3 % 미만인 경우에는 별도의 설계변수 조정을 요구하여 냉간가공경화 부위의 취성적 거동을 제어하고 있다.

냉간성형 압축재의 설계는 유효폭법이나 직접강도법을 적용할 수 있다. 유효폭법은 단면을 각 요소로 나누어 좌굴거동에 따라 유효폭을 산정한 후 유효단면적을 구하기 때문에 감소된 단면 특성이 전체좌굴에 미치는 영향을 고려할 수 있다. 그러나 복잡한 단면 형상에 적용이 불리하다는 단점이 있다. 직접강도법은 유한스트립법 등을 활용하여 개단면 형상의 다양한 좌굴모드의 강도를 결정할 수 있는 장점이 있다. 또한 총단면적을 사용하여 최소 요소좌굴응력으로 강도를 산정할 수 있으며 다소 복잡한 형태의 단면에도 적용할 수 있다. 그러나 다소 보수적인 결과를 도출한다. 두 방법의 강도 산정방식 차이로 인해 국내 소재를 적용한 냉간성형강 부재의 설계적합성 평가가 요구된다.

한편, 구조설계 실무자들은 다소 복잡하고 번거로워 보이는 현행 냉간성형강 설계기준에 대한 우회 방법으로 강구조 부재 설계기준에 따라 냉간성형강의 설계를 수행하고 있다. 그러나 이 방법은 냉간가공경화에 따른 소재특성의 변동과 단면 내 중간스티프너로 인한 거동 변화 등을 적절히 반영하지 못하는 문제가 존재하고 있다.

이 연구에서는 전술한 최소 연신율 10 % 조건과 항복비 요구 조건을 만족하는 국내 냉간성형용 강재를 적용하여 제작한 ㄷ형 단면을 갖는 냉간성형강 압축

재에 중심축 재하를 하여 좌굴거동을 확인하였다. 또한 현행 냉간성형강 설계기준과 강구조 부재 설계기준의 압축재 설계조항의 적합성 여부를 실험적, 해석적으로 면밀히 검토하였다.

## 1.2 선행연구 고찰

국외에서는 KDS 41 30 30의 기반이 되는 AISI 기준을 대상으로 냉간성형 부재의 단면형상변형좌굴강도를 검토한 바 있으며(B.W.Schafer, 2000)<sup>[3]</sup>, 부록 설계법으로 기재된 바 있는 직접강도법의 적용성에 대한 평가 또한 이루어졌다(B.W. Schafer, 2008)<sup>[4]</sup>. 이외에도 냉간성형 립 $\sigma$ 형강을 조립하여 구성한 단면을 대상으로 강도를 평가하는 연구(Yan Lu et al, 2017)<sup>[5]</sup> 등 기준에 적용 가능한 강재를 대상으로 기준의 적합성에 대한 연구가 지속적으로 이루어졌다.

국내 연구로, 신태송(2006)<sup>[6]</sup>은 압축과 휨모멘트 조합하중에 대한 스틸스터드 부재의 내력성능을 평가한 바 있다. 최인락(2020)<sup>[7]</sup>의 연구에서는 냉간성형 휨부재의 휨강도를 직접강도법과 유효폭법을 이용하여 평가하였다. 냉간성형 부재 이외에도 류승완(2015)<sup>[8]</sup>은 용접형강에 대해 직접강도법의 적용성에 대해 연구한 바 있다. 앞서 언급한 국내 선행연구들은 당시 존재하던 냉간성형강 구조설계기준(1999, 허용응력설계법) 대신 한계상태설계법에 기반하여 작성된 AISI 및 Euro code 등의 기준을 이용하여 연구를 진행함으로써 국내 기준의 선진화를 유도하였다. KDS 41 30 30 제정 이후, 강현식(2022)<sup>[9]</sup>은 중심압축력을 받는 국내 탄소강 각형강관 압축재의 좌굴거동에 대해 해당 기준을 통해 평가한 바 있다. 그러나 여전히 국내 강재를 이용한 KDS 41 30 30의 적합성 연구 현황은 미비한 상황이다. 이번 연구에서 KDS 41 30 30을 통해 좌굴거동을 평가하되 앞선 연구와 달리 중심압축력을 받는 국내 냉간성형  $\sigma$ 형강 압축재에 대해 좌굴강도를 평가하여 기준의 적합성을 확인할 것이다.

## 1.3 연구방법

(1) 실험을 위한 강재를 선정하여 시편시험을 통해 강재의 재료물성치를 측정한다. 해당 강재를 활용하여 끝단스티프너 보강된  $\sigma$ 형과 경 $\sigma$ 형 단면 형태로 냉

간성형부재 실험체를 제작한다. 변수는 단면의 규격과 실험체의 길이로 선정한다. 좌굴길이계수를 단순화하기 위해 실험체의 단부는 회전단으로 구성한다. 중심압축실험을 통해 좌굴거동을 확인하고 좌굴강도를 측정한다.

(2) 비선형 유한요소해석을 위해 시편시험 결과를 활용하여 재료물성치를 적절하게 변환한다. 해석모델의 요소는 솔리드로 구성하고, 크기는 5 mm × 5 mm로 적용되며, 모서리 부분에서 세밀하게 나누고, 판을 두께방향으로 더 나누어 준다. 각 단부에서 실험체 지그의 크기만큼 떨어진 위치(70 mm)에 제어점을 생성한다. 제어점과 실험체 해석모델은 커플링으로 연결한다. 이때 실험체 해석모델의 도심을 제어점의 중심과 일치시킨다. 해석모델의 한쪽 단부는 회전단( $U_x=U_y=U_z=R_x=R_z=0$ ), 다른 한쪽 단부는 변위 제어를 위해 이동단( $U_x=U_y=R_x=R_z=0$ )로 설정한다. 좌굴해석 우선 수행 후, 좌굴형상을 초기불완전 수치로 입력한다. 해석 수행 후 실험값과 비교하여 해석모델의 정확성을 검증한다.

(3) 추가적인 좌굴유효길이를 가지는 부재의 해석 및 해석 시간 단축을 위해 수정된 해석모델을 구성한다. 요소는 쉘로 구성하며, 크기는 10 mm × 10 mm로 적용한다. 재료물성치는 항복강도와 인장강도로 구성된 삼선형 모델로 입력한다. 해석 수행 후 실험값 및 이전 해석값과 오차를 비교하고, 오차율이 합리적으로 판단될 시 수정된 해석모델을 이용하여 추가적인 좌굴유효길이를 가지는 부재를 해석한다.

(4) 냉간성형 부재설계방법(유효폭법, 직접강도법) 및 강구조 부재설계법(KDS 14 31 10)을 활용하여 각 실험체의 설계기준 압축강도를 산정한다. 유효좌굴길이는 30 mm에서 3,300 mm 까지 가정하여 강도를 산정한다. 이번 연구에서 실험시 중심축 재하를 하기 때문에 설계기준 적용 시 균일압축을 받는 단면으로 설계한다. 중심압축실험 결과 및 유한요소해석 결과, 설계압축강도 산정 결과를 비교, 분석하여 냉간성형강 설계기준(KDS 41 30 30)의 적합성을 검토한다.

## II. 설계기준 분석

### 2.1 냉간성형강 설계기준(KDS 41 30 30)

냉간성형강 구조설계기준(1999)은 허용강도설계법에 기반한 설계법으로, 현행 강구조 설계기준과 비교하여 낙후된 개념이며 KDS에 등재되지 않았다.<sup>[10]</sup> 최신 기준 및 국내 강재를 반영하기 위해 냉간성형강 설계기준(KDS 41 30 30)이 AISI S100-16을 기반으로 집필되었으며, 국내 설계 환경을 고려하여 강구조 설계기준(KDS 14 31 10)<sup>[11]</sup>과 동일하게 하중저항계수설계법만을 적용한다. 기존의 냉간성형강 구조설계기준(1999)와 냉간성형강 설계기준(KDS 41 30 30)의 각 항목에 대응되는 항목들을 다음 표 2.1에서 비교하였다.

KDS 41 30 30에서는 냉간성형용 주요 강재 규격을 표기하고 있으며 강재의 물성치 조건에 따라 설계기준 적용을 엄격히 제한하고 있다(2.3절 참조). 표 2.2에 표기된 냉간성형용 국내산 강재들은 2.3절의 설계제한 조건을 모두 만족하는 강재이며, 별도의 제한사항을 적용하지 않고 사용할 수 있다.

표 2.1 국내 냉간성형강 설계기준 비교

냉간성형강 구조설계기준(AIK: 1999)		KDS 41 30 30 냉간성형강 설계기준	
1	총칙	1	일반사항
	-	2	조사 및 계획
2	재료 및 강도	3	재료
3	부재 설계	4	설계
3.1	판폭두께비 제한	4.1	안전성 설계
3.2	유효폭	4.2	인장 부재
3.3	인장재	4.3	압축 부재
3.4	휨재	4.3.2	항복 및 전체 좌굴
3.5	압축재	4.3.3	국부좌굴
3.5.1	허용압축강도	4.3.3.1	유효폭법
3.5.2	압축재의 세장비	4.3.3.2	직접강도법
		4.3.4	단면형상변형좌굴
		4.4	휨부재
		4.5	전단 및 크리플링
3.6	기둥재	4.6	조합력을 받는 부재
4	조립구조재	4.7	조립재와 시스템
5	접합부	4.8	접합 및 접합부
6	제작 및 시공	4.9	특수한 경우의 강도
		4.10	사용성 설계
7	시험 및 검사	4.11	피로 설계
		4.12	판요소의 유효폭
8	부록	4.13	부재의 탄성좌굴 해석

표 2.2 KDS 41 30 30 주요 강재 규격

번호	명칭	강종
KS D 3030	용용 아연 마그네슘 알루미늄 합금 도금 강관 및 강대 (SGMH)	SGMH245Y, SGMH295Y, SGMH335Y, SGMH365Y, SGMH400Y, SGMC245Y, SGMC295Y, SGMC335Y, SGMC365Y, SGMC560Y
KS D 3503	일반 구조용 압연 강재 (SS)	SS235, SS275, SS315, SS410, SS450, SS550
KS D 3506	용용 아연 도금 강관 및 강대 (SGH, SGC)	SGH245Y, SGH295Y, SGH335Y, SGH365Y, SGH400Y, SGC245Y, SGC295Y, SGC335Y, SGC365Y SGC560Y
KS D 3512	냉간 압연 강관 및 강대 (SPC)	SPCD, SPCE, SPCF, SPCG
KS D 3515	용접 구조용 압연 강재 (SM)	SM275A, B, C, D, -TMC SM355A, B, C, D, -TMC SM420A, B, C, D, -TMC SM460B, C, -TMC
KS D 3529	용접 구조용 내후성 열간압연 강재(SMA)	SMA275AW, AP, BW, BP, CW, CP SMA355AW, AP, BW, BP, CW, CP
KS D 3530	일반 구조용 경량 형강(SSC)	SSC275
KS D 3542	고 내후성 압연 강재(SPA)	SPA-H, SPA-C
KS D 3566	일반 구조용 탄소 강관 (SGT)	SGT275, SGT355, SGT410, SGT450, SGT550
KS D 3568	일반 구조용 각종 강관 (SRT)	SRT275, SRT355, SRT410, SRT450, SRT550
KS D 3632	건축 구조용 탄소 강관 (SNT)	SNT275E, SNT355E, SNT460E, SNT275A, SNT355A, SNT460A
KS D 3770	용용 50% 알루미늄 아연 합금 도금 강관 및 강대 (SGLH, SGLC)	SGLH295Y, SGLH335Y, SGLH365Y, SGLH400Y, SGLC295Y, SGLC335Y, SGLC365Y, SGLC560Y
KS D 3781	철탑용 고장력강 강재(SH)	SH450P, SH450S
KS D 3854	건축 구조용 표면 처리 경량 형강(ZSS)	ZSS295Y
KS D 3861	건축 구조용 압연 강재 (SN)	SN275A, B, C SN355B, C SN460B, C
KS D 3864	건축 구조용 냉간 각종 탄소 강관(SNRT)	SNRT295E, SNRT360E, SNRT275A, SNRT355A

## 2.2 국외 설계기준

### 2.2.1 Eurocode 3<sup>[12]</sup>

EN 1993-1-5<sup>[13]</sup>에서 단면의 유효폭을 산정하는 방법을 다룬다. 냉간성형강 관련 기준은 EN 1993-1-3<sup>[14]</sup>로 설계절차는 다음과 같다. 우선 부재 길이에 따른 유효좌굴길이별 탄성좌굴응력을 산정하고 그 좌굴모드를 판단한다. 최소 국부좌굴 응력을 기반으로 EN 1993-1-5를 참조하여 유효폭을 산정한다. 최소 단면형상변형좌굴 응력을 기반으로 모서리 및 스티프너의 두께 감소량을 결정한다. 부재 길이 및 유효단면적에 대해 좌굴모드(휨, 비틀림 및 뒤틀림 좌굴)에 따라 전체 좌굴강도를 구한다. 부재 길이 및 좌굴모드에 따른 좌굴 특성 및 산정 강도의 예시를 그림 2.1에 나타냈다. 전체 좌굴 강도와 국부 좌굴강도가 유사하게 나타나는 구간(그림 2.1 강조된 부분 참조)에서 국부좌굴-전체좌굴이 상호작용하는 좌굴거동이 나타난다.

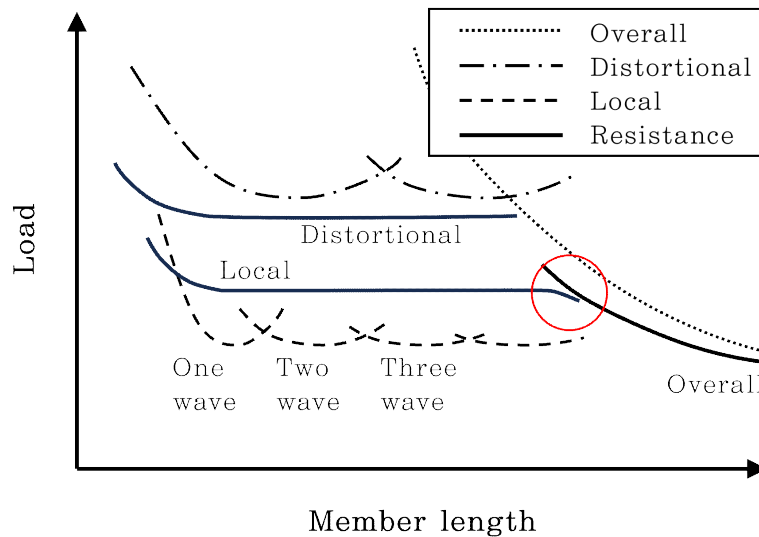


그림 2.1 EN 1993-1-3 설계 예시

### 2.2.2 AISI Standard, AISI S100-16<sup>[15]</sup>

직접강도법은 AISI S100-12에서 부수적인 설계법이었지만 AISI S100-16에서

주요 설계법으로 도입되었다. KDS 41 30 30이 AISI S100-16을 기반으로 작성되었기 때문에 강도 산정 방법은 KDS 41 30 30과 유사하다. 이 연구에서 요구되는 설계강도는 균일압축을 받는 단면의 좌굴강도로 산정 방법은 3장에서 자세히 다룰 것이다.

## 2.3 설계 고려사항

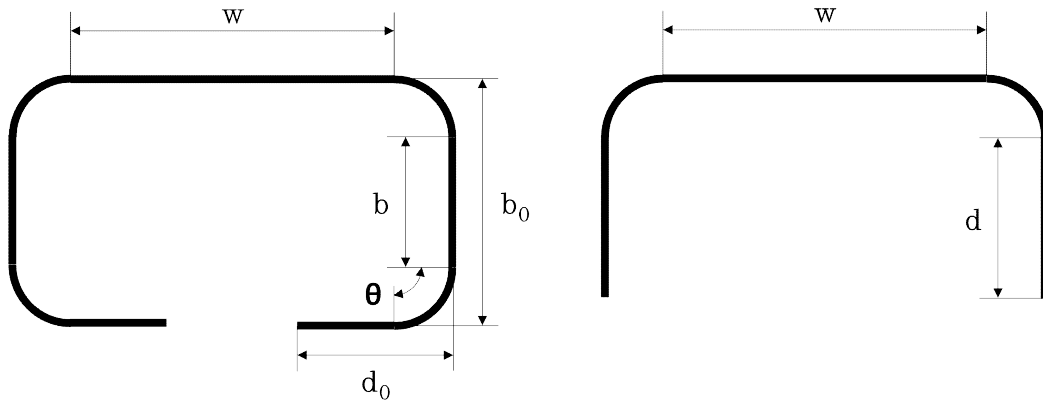
### 2.3.1 부재 설계에 대한 적용 한계

유효폭법 또는 직접강도법에 따라 설계강도를 산정할 시 다음 표 2.3의 조건을 만족해야 한다. 이 연구에서 사용된 강재 및 단면 규격은 해당 한계조건을 모두 만족한다.



표 2.3 부재설계에 대한 적용 한계

조건	제한변수	유효폭범	직접강도범	실험체
압축을 받는 구속판요소	$w/t$	$\leq 500$	$\leq 500$	146.5
압축을 받는 단부 구속판요소	$b/t$	$I_s \geq I_a, \leq 90$ $I_s < I_a, \leq 60$	$\leq 160$	35.67
압축을 받는 비구속판요소	$d/t$	$\leq 60$	$\leq 60$	13.67
안쪽 구부림 반지름	$R/t$	$\leq 10$	$\leq 20$	2
단순 끝단스티프너 길이/폭 비	$d_0/b_0$	$\leq 0.7$	$\leq 0.7$	0.4
끝단스티프너 유형		단순	단순 및 복합	단순
공칭항복강도	$F_y$	$< 590$ MPa	$< 655$ MPa	512 MPa



$R$ : 모서리 내측반경

$t$ : 판 두께

$$\ast I_s = (d^3 t \sin^2 \theta) / 12$$

$$I_a = 399t^4 \left( \frac{w/t}{1.28\sqrt{E/F_y}} - 0.328 \right)^3 \leq t^4 \left( 115 \frac{w/t}{1.28\sqrt{E/F_y}} + 5 \right)$$

### 2.3.2 연신율 제한

KDS 41 30 30에서 적용 가능한 강재의 항복강도 및 인장강도를 제시하고 있으며, 강재의 연신율에 따라 제한사항을 부여한다. 연신율별 제한사항을 표 2.4에 나타냈다.

냉간성형으로 강재를 소성가공하여 단면을 구성할 때 절곡부는 변형경화에 따른 강도증가를 수반하게 된다. 또한 소성가공의 제하(unloading)과정에서 발생한 잔류변형은 강재의 연신률을 낮추는 요인이 된다. 연신률이 극단적으로 낮은 강재일 경우, 절곡부의 강재 표면에서 조기균열이 나타나 취성적 거동을 보이게 될 수 있다. 현행 설계기준에서는 이러한 변형경화 메커니즘을 반영하여 연신율과 항복비에 따라 설계제한 사항을 두고 있는 것으로 파악된다.

4장에서 후술하겠지만, 이 연구의 실험체에 적용한 강재는 연신율 10 % 이상, 항복비 93 % 이하에 해당하여 별도의 제한을 받지 않는다.

표 2.4 최소 연신율에 따른 적용 제한

최소 연신율	제한사항	실험체
연신율 $\geq 10\%$ , 항복비 $\leq 93\%$	별도 제한 없음	✓
$10\% > \text{연신율} \geq 3\%$	항복강도 및 인장강도를 10% 저감하여 산정	
$3\% > \text{연신율}$	복수 웨브를 갖는 부재에만 설계변수 조정을 통해 적용가능	

### 2.3.3 냉간성형에 의한 항복강도 및 강도 증가<sup>(16, 17)</sup>

전술하였듯 냉간성형강 부재의 절곡부에서는 변형경화에 따른 강도가 수반된다. 현행 기준에서는 설계강도 산정 시 단면의 일부에서 증가된 강도를 고려하는 것이 허용된다. 증가된 평균항복강도  $F_{ya}$ 는 다음 식에 의해 산정한다.

$$F_{ya} = CF_{yc} + (1 - C)F_{yf} \leq F_{uw} \quad (2-1)$$

여기서,  $C$  : 전체단면적에 대한 모서리 단면적의 비

$F_{yc}$  : 모서리의 인장항복강도로 다음과 같이 산정한다.

$$F_{yc} = \frac{B_c F_{yw}}{(R/t)^m} \quad (2-2)$$

$$\text{여기서, } B_c = 3.69(F_{uw}/F_{yv}) - 0.819(F_{uw}/F_{yv})^2 - 1.79 \quad (2-3)$$

$F_{yv}$ : 원강재의 설계기준항복강도

$R$ : 모서리의 내측 반경

$t$ : 단면 두께

$$m = 0.192 \left( \frac{F_{uw}}{F_{yv}} \right) - 0.068 \quad (2-4)$$

$F_{uw}$ : 원강재의 인장강도

$F_{uf}$ : 원강재의 항복강도

### III. 냉간성형 압축부재 설계과정

기존의 냉간성형강 구조설계기준은 유효폭법에만 기반하였으나(산정 예제는 부록 A 참조), 2022년에 제정된 냉간성형강 설계기준에서는 직접강도법 또한 적용할 수 있게 되었다. 새롭게 제정된 KDS 41 30 30에 따르면, 냉간성형 압축부재는 각 좌굴 한계상태에 대한 강도 중에서 가장 작은 값을 강도로 결정한다(산정 예제는 부록 B 참조, 예제 결과 비교를 부록 C에 나타냄).

#### 3.1 항복 및 전체 좌굴

냉간성형 압축부재는 국부좌굴과 전체좌굴이 상호작용하여 나타나기 때문에 이를 고려하기 위하여 항복 및 전체 좌굴강도를 우선적으로 산정해야 한다. 항복 및 전체(휨좌굴, 비틀림좌굴, 휨비틀림좌굴)좌굴에 대한 공칭축강도  $P_{ne}$ 는 다음과 같이 산정한다.

$$P_{ne} = F_n A_g \quad (3-1)$$

여기서,  $A_g$ : 부재의 총단면적

$F_n$ : 공칭압축응력

냉간성형강 부재의 공칭압축응력  $F_n$ 은 다음과 같이 강구조 부재 설계기준 (KDS 14 31 10)과 동일한 형태를 적용하고 있다.

(1)  $\lambda_c \leq 1.5$ 인 경우

$$F_n = F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad (3-2)$$

(2)  $\lambda_c > 1.5$ 인 경우

$$F_n = F_{cr} = \left( \frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad (3-3)$$

$$\text{여기서, } \lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} \quad (3-4)$$

여기서,  $F_{cre}$ : 탄성 전체(휨좌굴, 비틀림좌굴, 휨비틀림좌굴)좌굴응력 중 최솟값  
 $F_y$ : 항복강도

탄성 전체 좌굴응력은 다음과 같이 산정한다.

이 연구에 해당되는 비틀림 또는 휨비틀림 좌굴에 지배받는 2축 또는 1축 대칭부재의 경우,

$$F_{cre} = \frac{1}{2\beta} \left[ (\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad (3-5)$$

$$\text{여기서, } \beta = 1 - (x_o/r_o)^2 \quad (3-6)$$

$$\text{여기서, } r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad (3-7)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left[ GJ + \frac{\pi^2 EC_\omega}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (3-8)$$

여기서,  $r_x, r_y$ : 주축에 대한 단면2차반경

$x_o$ : 도심에서 전단중심까지의 x주축방향 거리(음수값으로 취함)

$G$ : 강재의 전단탄성계수

$A$ : 부재의 총단면적

$G$ : 강재의 전단탄성계수

$J$ : 비틀림상수

$E$ : 강재의 탄성계수

$K_t$ : 비틀림좌굴에 대한 유효길이계수(이 연구에서는 1)

$L_t$ : 비틀림에 대한 압축재의 비지지길이(이 연구에서는 유효좌굴길)

이와 동일)

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} \quad (3-9)$$

여기서,  $K_x$ : x축 휨에 대한 유효길이계수(이 연구에서는 1)

$L_x$ : x축에 대한 휨을 받는 압축재의 비지지길이(이 연구에서는 유효 좌굴길이와 동일)

## 3.2 항복 및 전체좌굴과 상호작용하는 국부좌굴

### 3.2.1 유효폭법

유효폭법은 박판에 가해지는 불균등한 응력분포를 고려하여 단면의 요소들을 각각 분리한 후 각 요소에서 등가의 유효단면을 산정하고, 각 요소들의 유효단면적을 합한 전체유효단면적으로 설계강도를 결정한다. 단면의 요소는 구속판과 비구속판으로 나뉘며, 비구속판의 경우 끝단스티프너의 유무로 나누어 산정한다.

균일압축을 받는 구속판요소의 유효폭  $b$ 는 다음과 같이 산정한다.

$$b = \rho w \quad (3-10)$$

여기서,  $w$ : 구속판의 평판폭

식 (3-10)의  $\rho$ 는 국부감소계수로서 다음과 같이 산정한다.

$\lambda \leq 0.673$ 일 때,  $\rho = 1$

$\lambda > 0.673$ 일 때,  $\rho = (1 - 0.22/\lambda)/\lambda$  (3-11)

$\lambda$ : 세장비,  $\left( = \sqrt{\frac{f}{E_{crl}}} \right)$  (3-12)

여기서,  $f$ : 식 (3-2), (3-3)에 의해 정의된  $F_n$  값

$$F_{cr1} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left( \frac{t}{w} \right)^2 \quad (3-13)$$

여기서,  $k$ : 판좌굴계수(구속판일 경우 4)

$E$ : 강재의 탄성계수

$t$ : 균일압축을 받는 구속판요소의 두께

$\mu$ : 강재의 푸아송비

$w$ : 요소의 평판폭

균일압축을 받는 비구속판요소의 유효폭은 식 (3-10)와 같이 산정하되, 판좌굴계수( $k$ )는 0.43으로 한다.

균일압축을 받는 비구속판요소 중 단순끝단스티프너가 있는 판요소의 경우 다음과 같이 유효폭을 산정한다.

(1)  $w/t \leq 0.328S$ 인 경우

$$b = w \quad (3-14)$$

$$b_1 = b_2 = w/2 \quad (3-15)$$

$$d_s = d'_s \quad (3-16)$$

(2)  $w/t > 0.328S$ 인 경우

$$b_1 = (b/2)(R_I) \quad (3-17)$$

$$b_2 = b - b_1 \quad (3-18)$$

$$d_s = d'_s(R_I) \quad (3-19)$$

여기서,  $w$ : 비구속판의 평판폭

$t$ : 단면의 두께

$$S = 1.28\sqrt{E/f} \quad (3-20)$$

$E$ : 강재의 탄성계수

$f$ : 압축플랜지의 응력

$b$ : 유효폭

$b_1$ : 구속부 유효폭

$b_2$ : 끝단스티프너부 유효폭

$d_s$ : 스티프너의 감소된 유효폭

$d'_s$ : 비구속판으로 산정된 스티프너의 유효폭

$$R_I = I_S / I_a \leq 1 \quad (3-21)$$

$I_S$ : 감소되지 않은 스티프너 단면 2차모멘트

$$= (d^3 t \sin^2 \theta) / 12 \quad (3-22)$$

$I_a$ : 적정 크기의 스티프너 단면 2차모멘트

$$= 399t^4 \left( \frac{w/t}{S} - 0.328 \right)^3 \leq t^4 \left( 115 \frac{w/t}{S} + 5 \right) \quad (3-23)$$

유효폭법을 사용한 항복 및 전체좌굴과 상호작용하는 국부좌굴에 대한 공칭축강도  $P_{nl}$ 은 다음과 같이 산정한다.

$$P_{nl} = F_n A_e \leq P_{ne} \quad (3-24)$$

여기서,  $F_n$ : 식 (3-2), (3-3)에 의해 정의된 공칭압축응력

$A_e$ : 식 (3-10) ~ (3-23)에 의해 결정된 유효단면적

$P_{ne}$ : 식 (3-1)에 의해 결정된 항복 및 전체좌굴 공칭축강도

### 3.2.2 직접강도법

유효폭법은 단면의 요소를 나누어 유효단면적을 계산한 후 합하여 전체유효단



면적을 계산해야하는 복잡함이 있으며, 개별요소들의 구속요건을 판정하는 것이 쉽지 않은 문제가 있다. 직접강도법은 이를 해결하기 위해 탄성좌굴응력을 근거로 유효단면적이 아닌 총단면적으로 강도를 결정한다. 다만 유한스트립법 등을 활용하여 부재의 탄성좌굴응력을 면밀히 결정하고자 할 경우 프로그램에 의존적일 수 있다.

집중하중을 받는 냉간성형강 부재의 국부좌굴강도  $P_{crl}$ 은 다음과 같이 결정할 수 있다. 이때 국부좌굴강도 산정은 요소들 중 가장 작은 좌굴응력을 갖는 요소를 기반으로 한다.

$$P_{crl} = A_g F_{crl} \quad (3-25)$$

여기서,  $A_g$ : 부재의 총단면적

$F_{crl}$ : 식 (3-13)에 의해 산정된 국부좌굴응력

직접강도법을 사용한 항복 및 전체좌굴과 상호작용하는 국부좌굴에 대한 공칭축강도  $P_{nl}$ 은 다음과 같이 산정한다.

(1)  $\lambda_t \leq 0.776$ 인 경우

$$P_{nl} = P_{ne} \quad (3-26)$$

(2)  $\lambda_t > 0.776$ 인 경우

$$P_{nl} = \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left( \frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne} \quad (3-27)$$

$$\text{여기서, } \lambda_t = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{crl}}} \quad (3-28)$$

여기서,  $P_{ne}$ : 식 (3-1)에 의해 산정된 공칭축강도

$P_{crl}$ : 식 (3-25)에 의해 산정된 국부좌굴강도

### 3.3 단면형상변형좌굴강도

구멍이 없는 부재의 단면형상변형좌굴 공칭축강도  $P_{nd}$ 는 다음과 같이 산정한다.

(1)  $\lambda_d \leq 0.561$ 인 경우

$$P_{nd} = P_y \quad (3-29)$$

(2)  $\lambda_d > 0.561$ 인 경우

$$P_{nd} = \left[ 1 - 0.25 \left( \frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \left( \frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y \quad (3-30)$$

$$\text{여기서, } \lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}} \quad (3-31)$$

여기서,  $P_{ne} = F_y A_g$

$F_y$ : 항복강도

식 (3-31)의  $P_{crd}$ 는 탄성임계단면형상변형좌굴강도로서 다음과 같이 산정한다.

$$P_{crd} = A_g F_{crd} \quad (3-32)$$

여기서,  $A_g$ : 부재의 총단면적

$$F_{crd} = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi \omega e} + k_{\phi}}{k_{\phi fg} k_{\phi \omega g}} \quad (3-33)$$

여기서,  $k_{\phi fe}$ : 플랜지에서 플랜지/웹 교차점으로 제공되는 탄성 회전강성

$$= \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \left[ EI_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + EC_{\omega f} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 GJ_f \quad (3-34)$$

$k_{\phi \omega e}$ : 웹에서 플랜지/웹 교차점으로 제공되는 탄성 회전강성

$$= \frac{Et^3}{6h_o(1-\mu^2)} \quad (3-35)$$

여기서,  $t$ : 모재의 두께

$h_o$ : 끝단에서 끝단까지의 웨브 깊이

$k_\phi$ : 요소 구속에 의해 플랜지/웨브 접합부에 제공되는 회전 강성(이 연구에서는 플랜지가 구속되지 않으므로 0)

$\bar{k}_{\phi fg}$ : 플랜지/웨브 교차점에서 플랜지에 요구되는 기하학적 회전강성

$$= \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \left\{ A_f \left[ (x_{of} - h_{of})^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right)^2 - 2y_{of}(x_{of} - h_{of}) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yt}}\right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right] + I_{xt} + I_{yt} \right\} \quad (3-36)$$

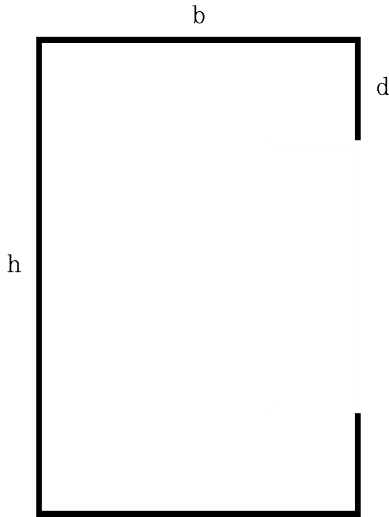
$\bar{k}_{\phi \omega g}$ : 플랜지/웨브 교차점에서 웨브에 요구되는 기하학적 회전강성

$$= \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \frac{th_o^3}{60} \quad (3-37)$$

여기서,  $L$ :  $L_{crd}$ 와  $L_m$ 의 최솟값(이 연구에서는 유효좌굴길이와 동일)

수식에 표기된 기하학적 물성치는 다음 표 3.1과 같이 산정한다.

표 3.1 C단면의 플랜지와 끝단스티프너의 기하학적 물성치

	$A_f = (b+d)t$ $I_{xf} = \frac{t(t^2b^2 + 4bd^3 + t^2bd + d^4)}{12(b+d)}$ $I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3)}{12(b+d)}$ $I_{x'f} = \frac{tb^2d^2}{4(b+d)}$ $C_{\omega f} = 0$ $x_{of} = \frac{b^2}{2(b+d)}$ $h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2db)}{2(b+d)}$ $h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2}{2(b+d)}$
<p><math>t</math>: 판 두께  <math>b, d, h</math>는 단면의 중간선 치수</p>	

## IV. 중심압축실험

시편시험을 통해 이 연구에 사용되는 강재의 성질 및 설계기준의 적용여부를 확인한다. 해당 강재를 활용한 실험체를 제작하여 중심압축실험을 진행하고 실험체별 좌굴강도를 측정한다.

### 4.1 시편시험

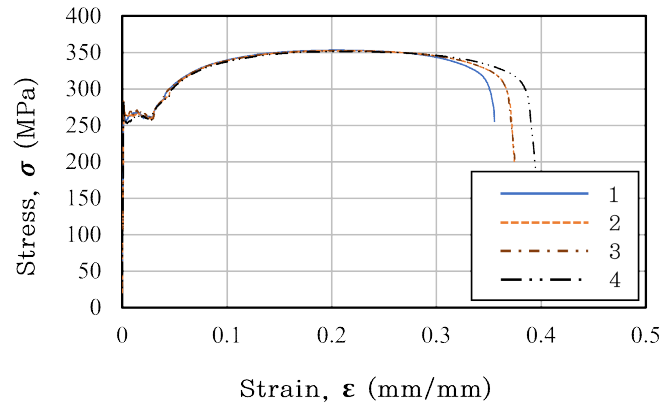
이 연구의 실험에 사용된 강재는 SSC275 및 SPFH590이다. SPFH590은 자동차 성형용 강재이나, 강재 규격상 최소 연신율과 항복비 조건을 만족하는 고강도 소재로서 실험에 채택하였다. 시편시험을 통하여 SSC275, SPFH590 강재의 항복강도와 연신율을 검증하고 유한요소해석에 반영, 설계강도 산정 시 적용된다.

표 4.1은 시편시험 결과이며, 그림 4.1은 시편시험으로 측정한 응력-변형률 곡선이다.

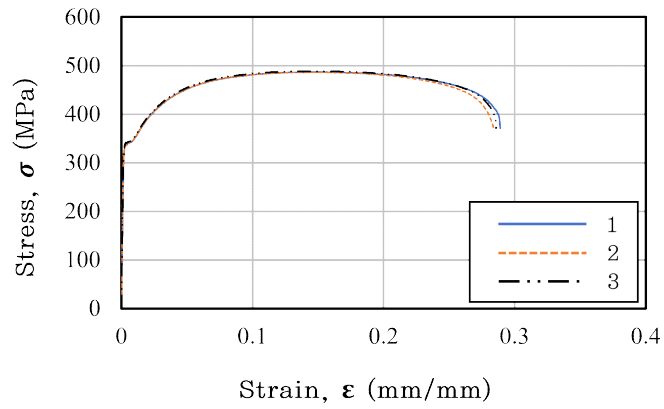
표 4.1 시편시험 결과

강종	두께 (mm)	번호	$E$ (MPa)	$F_y$ 0.2 % (MPa)	$F_u$ (MPa)	항복비 $F_y/F_u$ (%)	연신율 (%)
SSC275	1.2	1	203,607	255.4	353.1	72.3	35.54
		2	198,257	262.9	352.5	74.6	37.45
		3	209,256	264.4	352.2	75.1	38.04
		4	212,048	255.8	351.3	72.8	39.47
	1.8	1	207,091	337.8	486.5	69.4	28.90
		2	205,820	336.7	486.2	69.3	28.39
		3	212,732	341.2	488.6	69.8	28.59
SPFH590	1.8	1	178,120	499.0	635.8	78.5	23.00
		2	195,410	512.0	638.2	80.2	22.57
		3	180,842	511.9	640.0	80.0	22.44

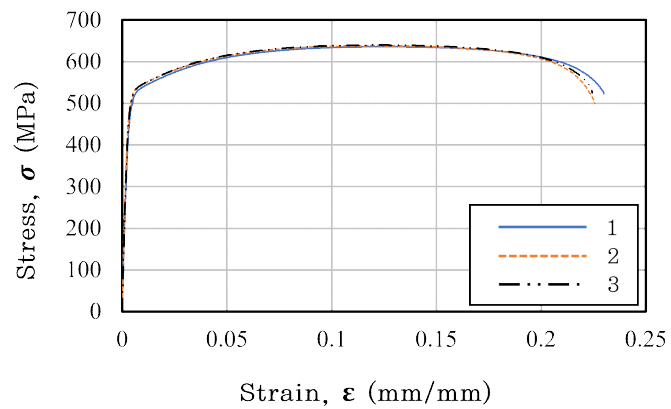
SSC275 강재는 항복비 최대 75.1 %, 최소 연신율 28.39 %, SPFH590 강재는 항복비 최대 80.2 %, 최소 연신율 22.44 %로 두 강재 모두 냉간성형강 설계기준 (KDS 41 30 30)을 별도의 제한 없이 적용할 수 있는 조건(항복비 93 % 이하, 최소 연신율 10 %이상)을 만족하였다.



(a) SSC275 - 1.2 mm



(b) SSC275 - 1.8 mm



(c) SPFH590 - 1.8 mm

그림 4.1 시편시험 결과(응력-변형률 곡선)

## 4.2 실험내용

중심압축실험에 사용된 단면형상은 일반  $\pi$ 형강(이하 경 $\pi$ 형강)과 단순끝단스티프너를 갖는  $\pi$ 형강(이하 립 $\pi$ 형강)이다. SSC275 강재를 사용한 실험체의 경우 길이 500 mm와 800mm, SPFH590 강재를 사용한 실험체의 경우 길이 500 mm, 650 mm, 800 mm로 구성하였다. 실험체의 단면 및 규격을 표 4.2에 나타냈다. 각 실험체 규격별로 동일한 실험을 2개씩 가력하여 총 28개의 결과값을 도출하였다. 실험 구성 형태를 그림 4.2에 나타냈다. 만능시험기(UTM)를 사용하여 가력하였으며, LVDT를 설치하여 수직변위 및 실험체 중앙의 수평변위를 측정하였다. 실험체 상하부에 썰기모양의 지그를 설치하여 약축에 대한 회전을 유도하였다. 상하부 지그의 썰기부에서 실험체까지의 두께는 각각 70 mm이다. 실험체 상, 하부 연결부의 두께가 각 70 mm이므로 좌굴유효길이는 실험체 길이에 140 mm를 합한 값이 된다(표 4.2의 실험체 길이에서 괄호 내 값에 해당). 중심압축 실험 결과, 실험체의 최대압축강도를 표 4.2에 나타냈다.  $P_{TEST}$ 는 실험에서 측정된 부재 최대압축강도다. 중심압축실험에 의한 좌굴 형상을 그림 4.3 ~ 4.8에 나타냈으며 실험 계측값을 그림 4.9 ~ 4.12에 나타냈다.

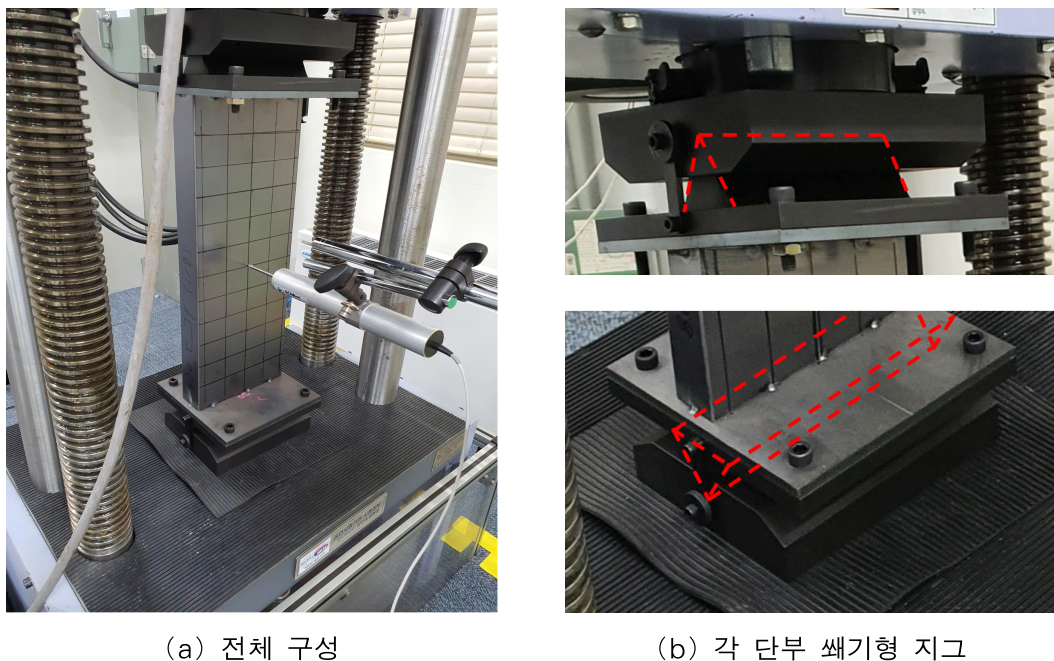


그림 4.2 실험 구성 형태

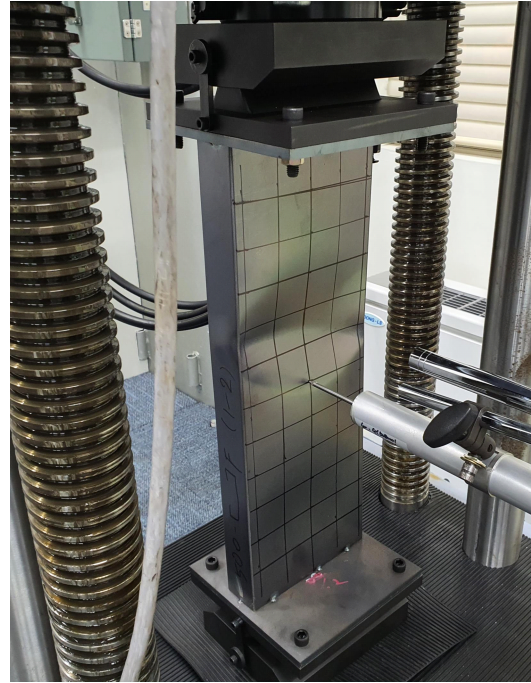
표 4.2 중심압축실험 실험체 규격 및 결과

강종	단면 (mm)	두께 (mm)	길이 (mm)	실험체 번호		$P_{TEST}$ (kN)
SSC275	Lipped-C 180×50×20	1.2	500	1	1-1	51.5
			(640)		1-2	49.0
			800	2	2-1	45.3
			(940)		2-2	47.7
		1.8	500	3	3-1	112
			(640)		3-2	112
			800	4	4-1	97.0
			(940)		4-2	96.2
	C 183×40×40	1.2	500	5	5-1	36.8
			(640)		5-2	35.1
			800	6	6-1	32.3
		(940)	6-2		32.1	
		1.8	500	7	7-1	80.8
			(640)		7-2	78.5
800	8		8-1	74.9		
(940)		8-2	71.0			
SPFH590	Lipped-C 180×50×20	1.8	500	9	9-1	168
			(640)		9-2	166
			650	10	10-1	135
			(790)		10-2	132
			800	11	11-1	123
			(940)		11-2	124
	C 184×40×40	1.8	500	12	12-1	97.9
			(640)		12-2	102
			650	13	13-1	104
			(790)		13-2	110
			800	14	14-1	78.0
			(940)		14-2	83.0





(a) 1-1



(b) 1-2



(c) 2-1



(d) 2-2

그림 4.3 실험체 좌굴형상(SSC275-Lipped-C-1.2mm)

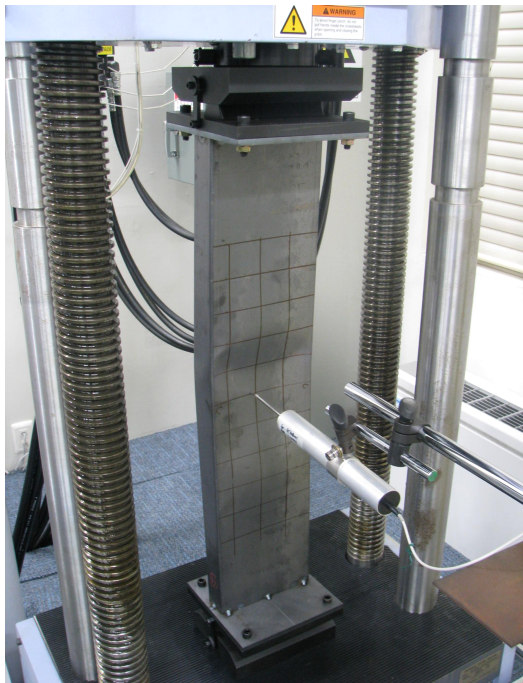




(a) 3-1



(b) 3-2



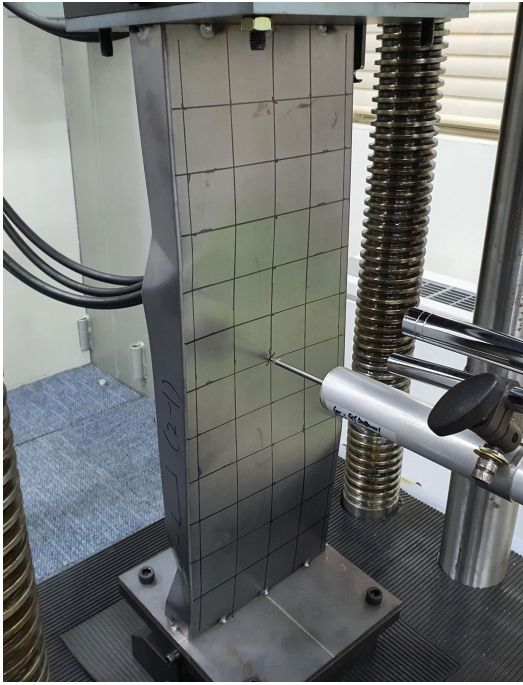
(c) 4-1



(d) 4-2

그림 4.4 실험체 좌굴형상(SSC275-Lipped-C-1.8mm)





(a) 5-1



(b) 5-2



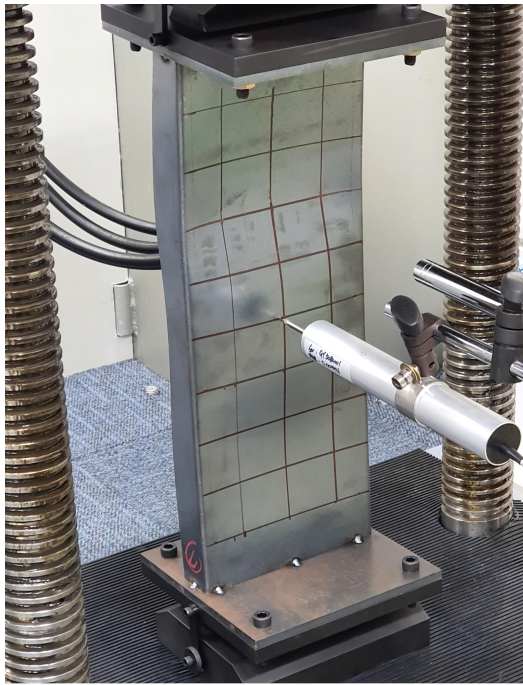
(c) 6-1



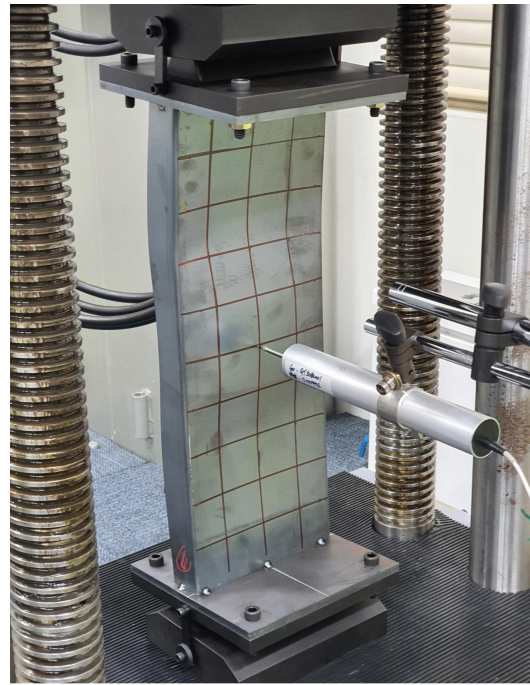
(d) 6-2

그림 4.5 실험체 좌굴형상(SSC275-C-1.2mm)





(a) 7-1



(b) 7-2



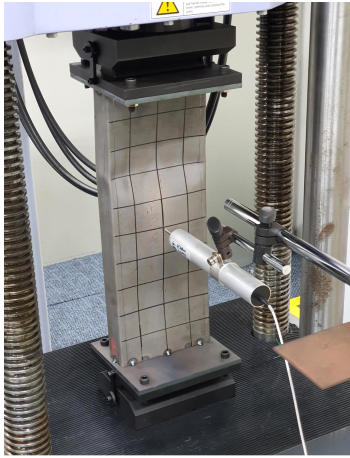
(c) 8-1



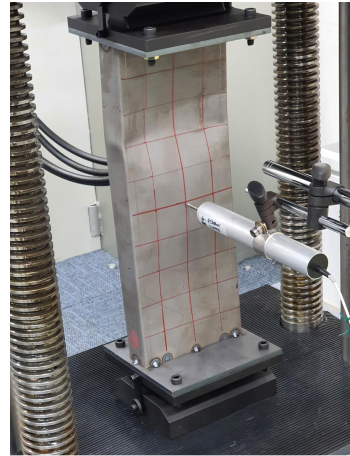
(d) 8-2

그림 4.6 실험체 좌굴형상(SSC275-C-1.8mm)

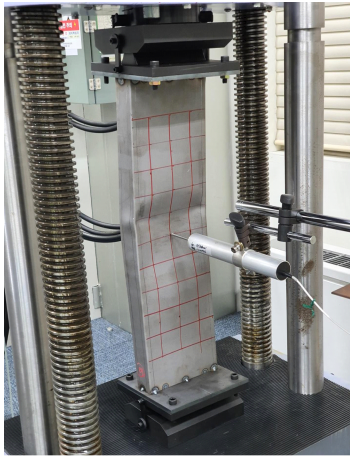




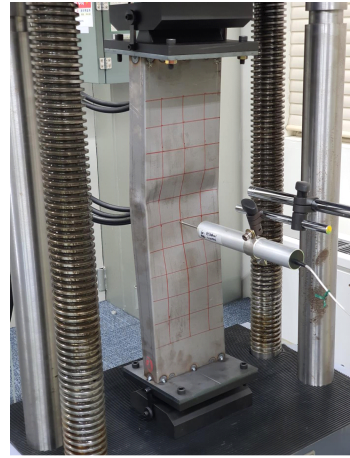
(a) 9-1



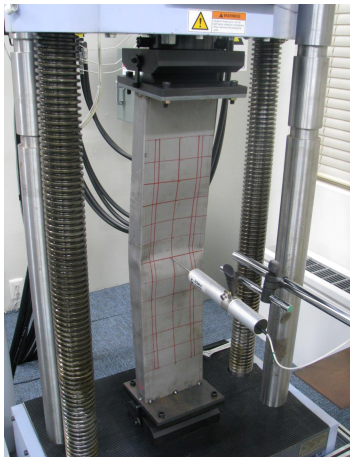
(b) 9-2



(c) 10-1



(d) 10-2

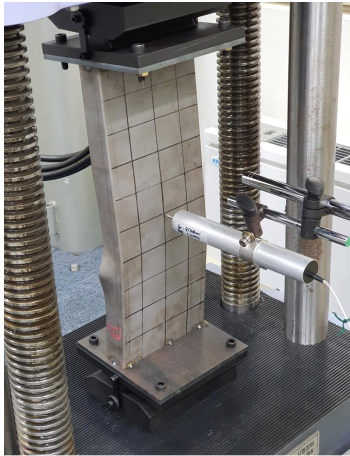


(e) 11-1

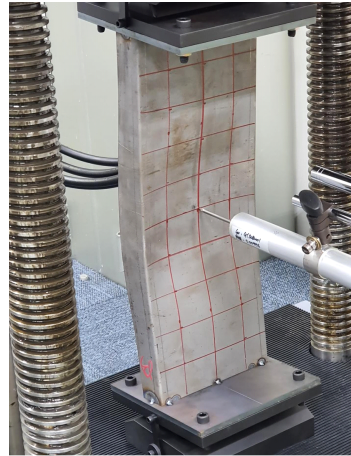


(f) 11-2

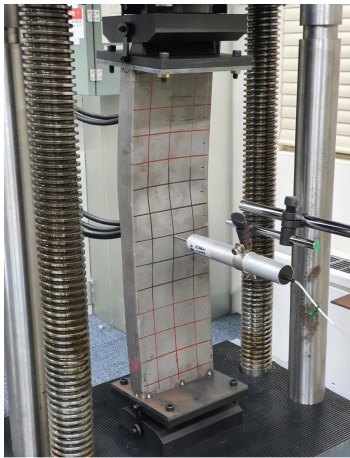
그림 4.7 실험체 좌굴형상(SPFH590-Lipped-C-1.8mm)



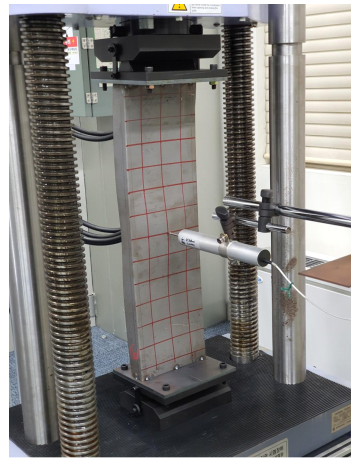
(a) 12-1



(b) 12-2

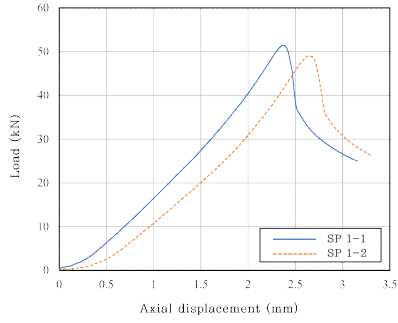


(c) 13-1

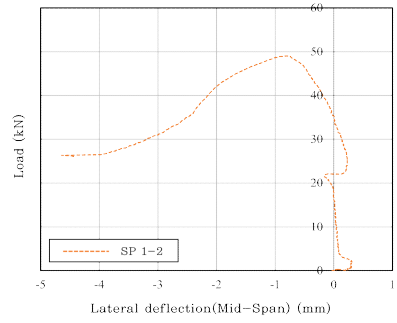


(d) 13-2

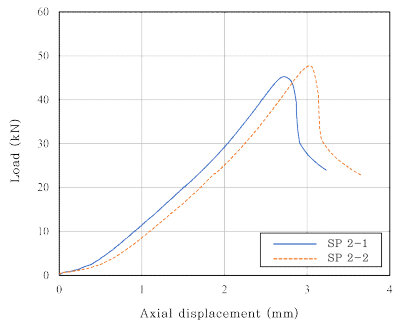
그림 4.8 실험체 좌굴형상(SPFH590-C-1.8mm)



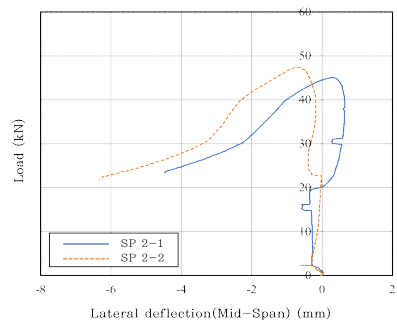
(a) 실험체 1(축변형)



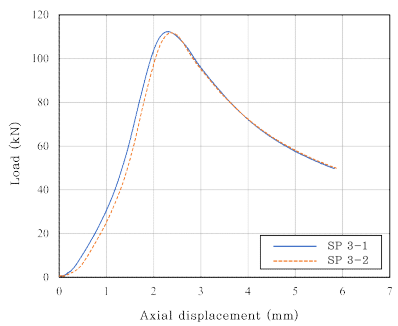
(b) 실험체 1(횡변형)



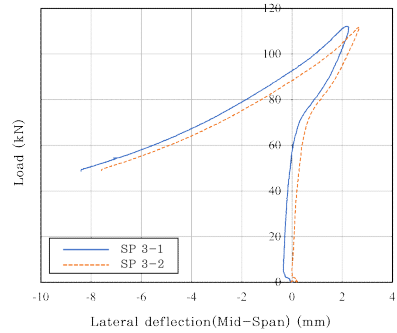
(c) 실험체 2(축변형)



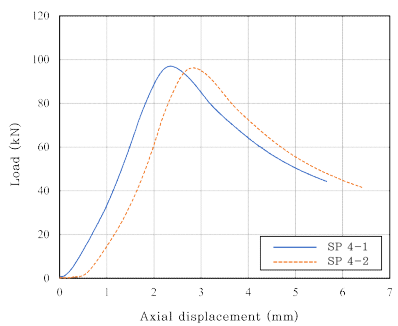
(d) 실험체 2(횡변형)



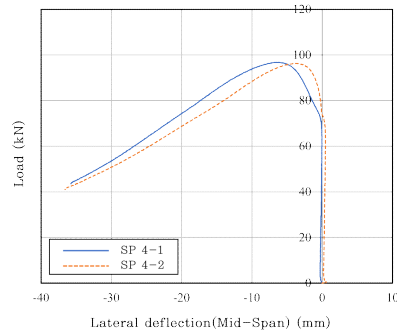
(e) 실험체 3(축변형)



(f) 실험체 3(횡변형)

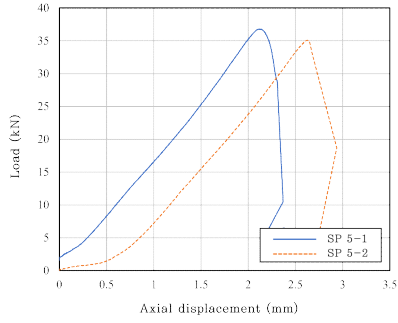


(g) 실험체 4(축변형)

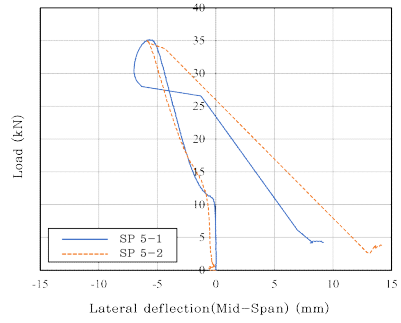


(h) 실험체 4(횡변형)

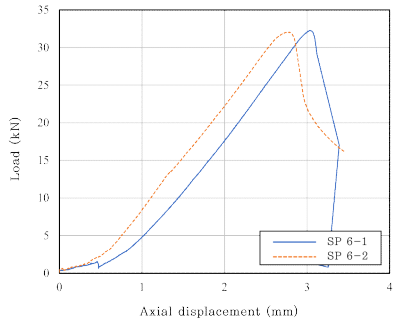
그림 4.9 실험체 축하중-변형 및 횡변위 관계 (SSC275-Lipped-C)



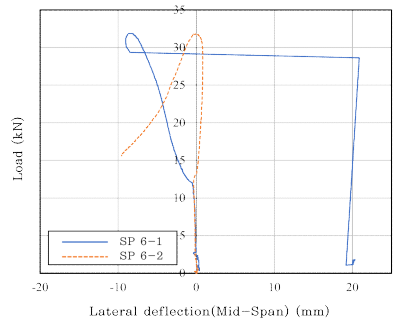
(a) 실험체 5(축변형)



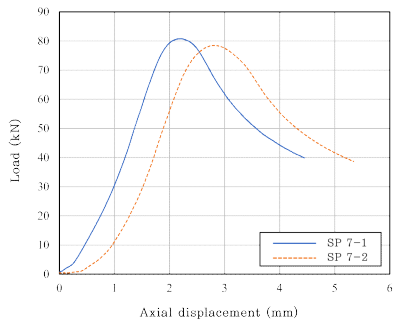
(b) 실험체 5(횡변형)



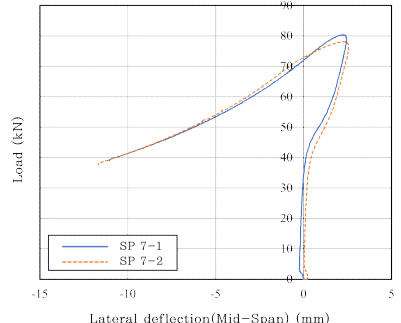
(c) 실험체 6(축변형)



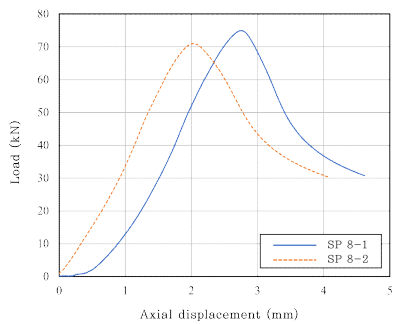
(d) 실험체 6(횡변형)



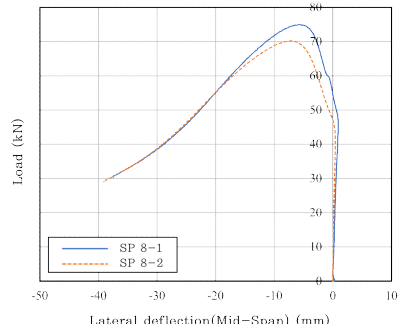
(e) 실험체 7(축변형)



(f) 실험체 7(횡변형)

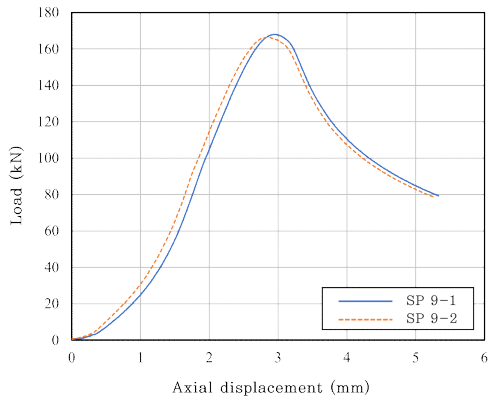


(g) 실험체 8(축변형)

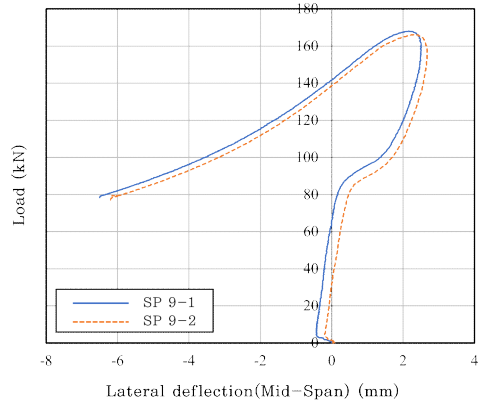


(h) 실험체 8(횡변형)

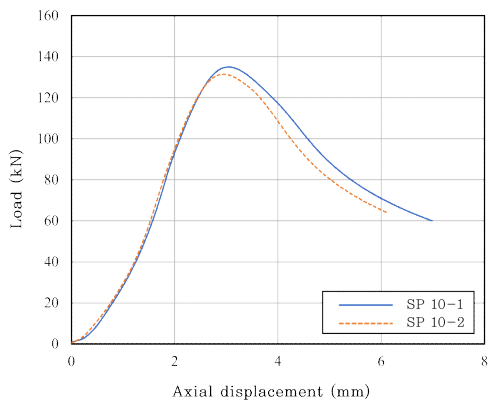
그림 4.10 실험체 축하중-변형 및 횡변위 관계 (SSC275-C)



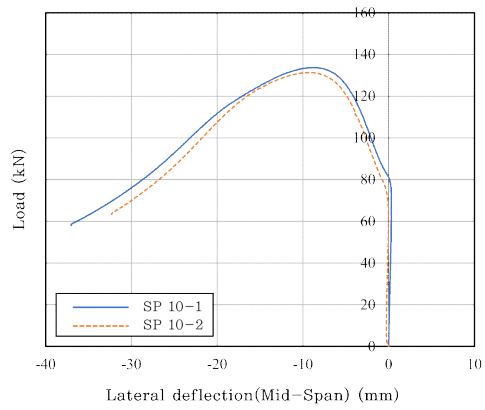
(a) 실험체 9(축변형)



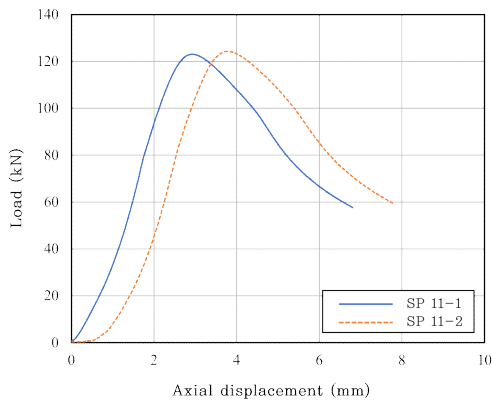
(b) 실험체 9(횡변형)



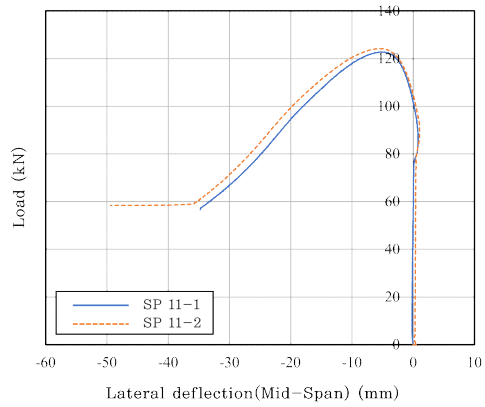
(c) 실험체 10(축변형)



(d) 실험체 10(횡변형)



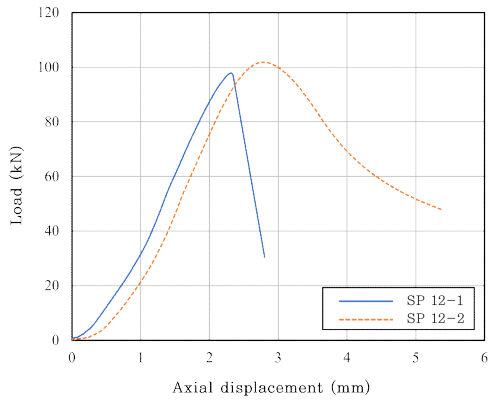
(e) 실험체 11(축변형)



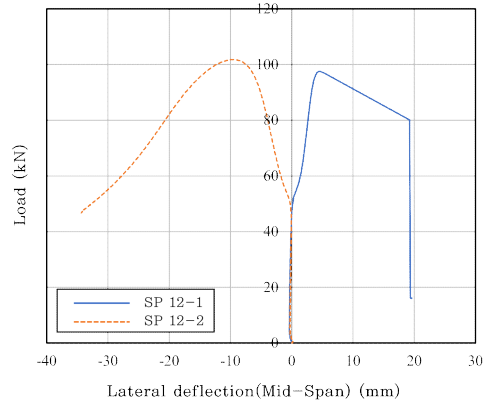
(f) 실험체 11(횡변형)

그림 4.11 실험체 축하중-변형 및 횡변위 관계 (SPFH590-Lipped-C)

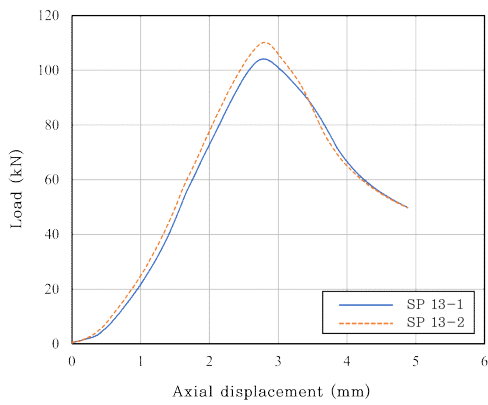




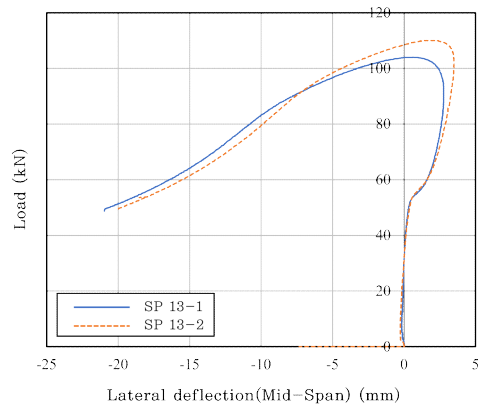
(a) 실험체 12(축변형)



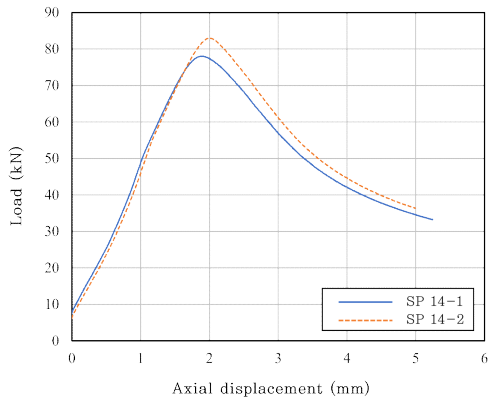
(b) 실험체 12(횡변형)



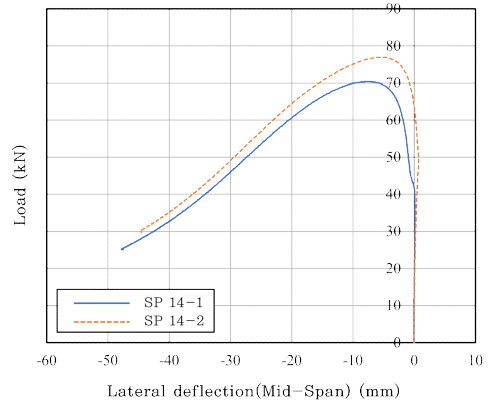
(c) 실험체 13(축변형)



(d) 실험체 13(횡변형)



(e) 실험체 14(축변형)



(f) 실험체 14(횡변형)

그림 4.12 실험체 축하중-변형 및 횡변위 관계 (SPFH590-C)

저장기기 문제로 인해 1-1번 실험체 축강도-횡변형 데이터, 14번 실험체의 사진을 유실하여 첨부하지 못하였다. LVDT로 측정된 횡변형 그래프를 통해 좌굴 거동을 확인할 수 있다. 전체적으로 실험체 길이가 변화하더라도 횡변형 시작점은 크게 변화하지 않았다(부록 D 참조). 3번 실험체와 같이 일부 실험체의 경우, 웨브가 LVDT 설치방향(+)으로 변형되다가 플랜지 국부좌굴로 인해 전체 좌굴이 발생되면서 반대방향(-)으로 변형하는 현상을 확인할 수 있다. 상대적으로 부재 길이가 짧은 실험체에서 나타난 현상이며, 부재길이가 짧을 때 전체 좌굴 강도가 국부좌굴 강도보다 크기 때문에 웨브 국부변형이 우선 발생한 것으로 판단된다. 12-1번 실험체는 최대강도 도달 이후 어떠한 내력도 발현하지 못하고 곧바로 붕괴하는 현상을 나타냈다. 항복강도 대비 세장한 요소를 가지는 부재가 LVDT 설치방향(+)으로 변형되면서 세장한 플랜지 부분의 국부좌굴의 발생으로 인한 것으로 판단된다. 앞서 언급한 결과들로 인해 이후 설계기준 압축강도 산정 시 국부좌굴에 의한 강도평가가 지배적일 것이며, 경ㄷ형강의 강도 평가는 안전측으로 설계될 것이라고 예측된다.

## V. 유한요소해석

실험에서 가력 조건의 한계로 인해 길이가 충분히 긴 실험체에 대해 압축좌굴 내력을 평가하지 못하였으며, 각 실험체의 실측 치수를 측정하지 못하였다. 우선 초기오차를 반영하지 않은 해석모델을 이용하여 적절한 해석기법을 선정한 후, 40 mm에서 3,140 mm까지의 다양한 유효좌굴길이를 갖는 해석모델을 추가하여 유효길이에 따른 좌굴거동을 확인하였다. 유한요소해석은 상용프로그램인 ABAQUS를 사용하여 재료 및 기하 비선형해석을 진행하였다. 시편시험을 통해 얻어낸 응력-변형률 곡선을 진응력-소성변형률로 변환한 후 단순화하여 재료물성치로 입력하였다.

### 5.1 해석모델

#### 5.1.1 해석모델 구성

실험값과 비교, 대조를 위한 해석모델(실험체 1)을 그림 5.1에 나타냈다.

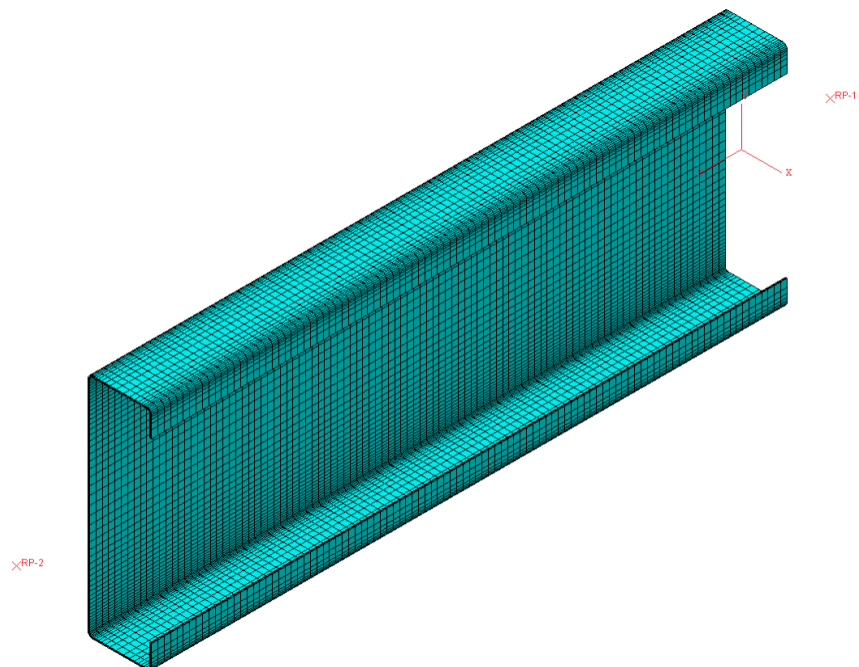
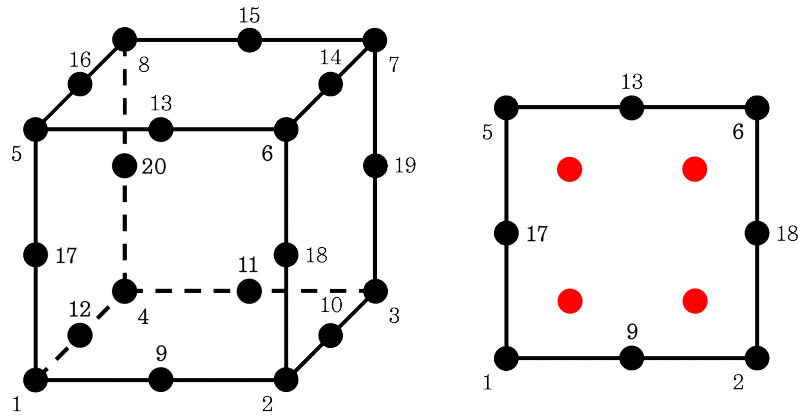


그림 5.1 해석모델(실험체 1)



Continuum, 3D, 20-node, Reduced integration

그림 5.2 솔리드요소(C3D20R)

모델의 요소는 부재를 정확히 모델링할 수 있도록 육면체 형상의 20개 노드를 가지는 솔리드요소(C3D20R, 그림 5.2 참조)로 구성하였다. 요소의 크기는 5 mm × 5 mm로 설정한 후, 모서리 부분에서 더 잘게 나누어 주었으며, 판 두께 방향으로 더 세밀하게 나누어 주었다. 실험체 해석모델과 가력 제어점(그림 5.1의 RP-1, RP-2 참조)을 커플링으로 연결하였다(췌기형 지그를 강체로 가정). 이때 실험체 해석모델의 도심과 가력점의 중심을 일치시켰다. 구속조건은 RP-1번 지점(그림 5.1 우측 참조)에서 회전단( $U_x=U_y=U_z=R_x=R_z=0$ ), RP-2번 지점(그림 5.1 좌측 참조)에서 재축방향 이동단( $U_x=U_y=R_x=R_z=0$ )으로 설정하였다. 뿔-좌굴(그림 5.3 참조) 및 좌굴 후 거동의 분석에 적절하다고 평가되는 Riks 방법을 사용하여 해석을 진행하였다.<sup>[18]</sup> 중심압축실험 구성과 유사한 상황을 모사하기 위해 해석방법은 변위제어로 하였으며, 증분 당 변위제어는 -0.01 mm로 하였다.

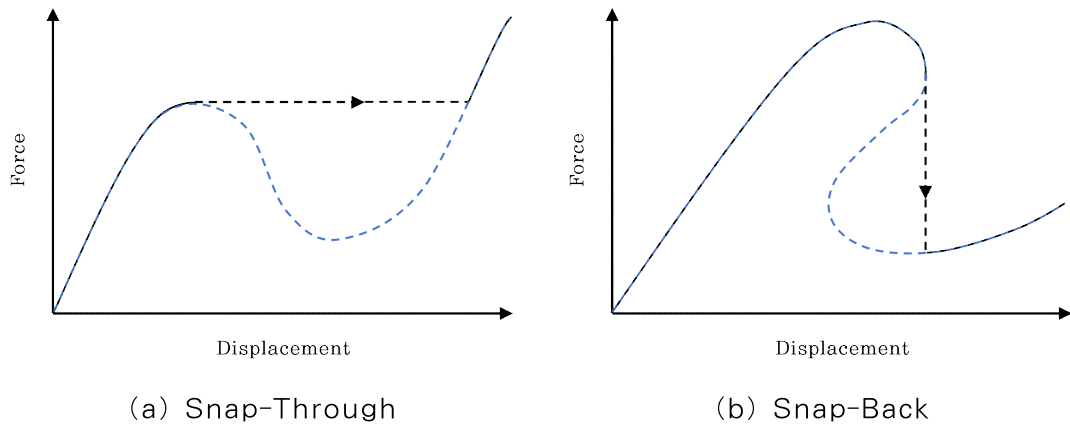


그림 5.3 뒹-좌굴현상

### 5.1.2 재료 물성치

ABAQUS에서 비선형해석을 수행하기 위해서 재료시험을 통해 얻어낸 공칭응력-공칭변형률 곡선을 진응력-소성변형률 곡선으로 변환해야 한다.<sup>[19]</sup> 공칭응력, 공칭변형률을 진응력, 진변형률로 변환하는 방법은 다음과 같다.

$$\text{True Stress: } \sigma_t = \sigma_n \times (1 + \epsilon_n) \quad (5-1)$$

$$\text{True Strain: } \epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_n) \quad (5-2)$$

탄성물성치와 소성물성치를 별도로 입력하므로, 소성물성치 입력 시 진변형률 값에서 탄성영역을 제외한 소성변형부분만 고려하면 된다. 진변형률에서 소성변형률로 변환하는 방법은 다음과 같다.

$$\text{Plastic Strain: } \epsilon_p = \epsilon_t - \sigma_t / E \quad (5-3)$$

냉간성형강 부재의 경우, 그림 5.4에서 보듯이 모서리 부분에서는 냉간성형에 의해 항복강도가 증가되며 연성능력이 감소한다<sup>[16]</sup>. 이때 항복강도는 22 %, 인장

강도는 17 %증가 하였으며, 변형률은 절반으로 감소하였다.<sup>[18,20]</sup> 따라서 모서리 부분에서는 수정된 재료물성치를 적용하였다. 인장시험 결과를 변환하여 얻어낸 진응력-소성변형률 곡선 및 모서리 부분의 재료물성치를 다음 그림 5.5에 나타냈다.

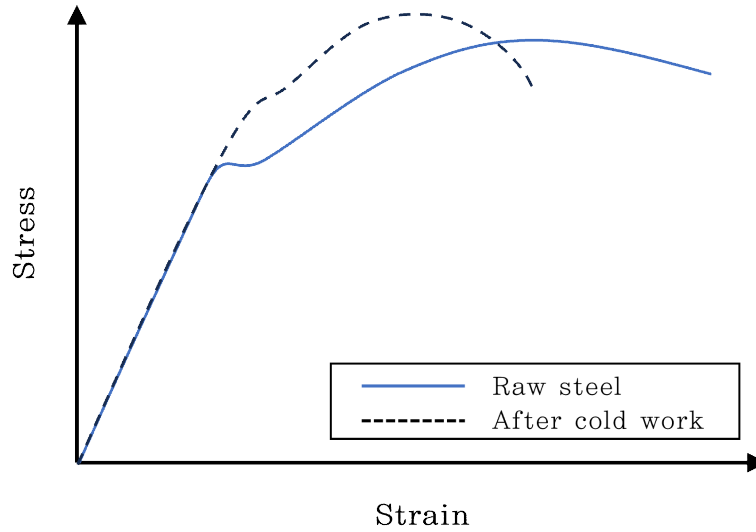
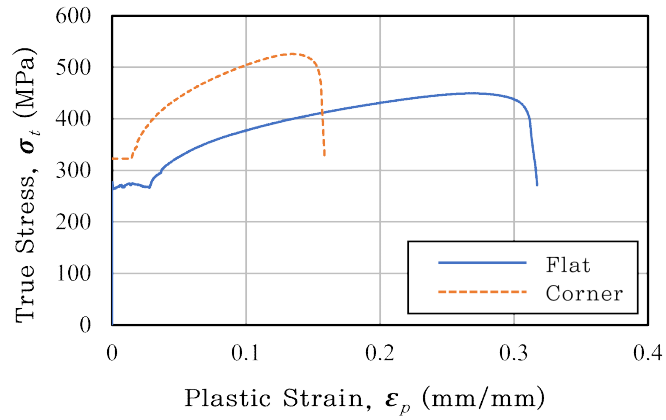
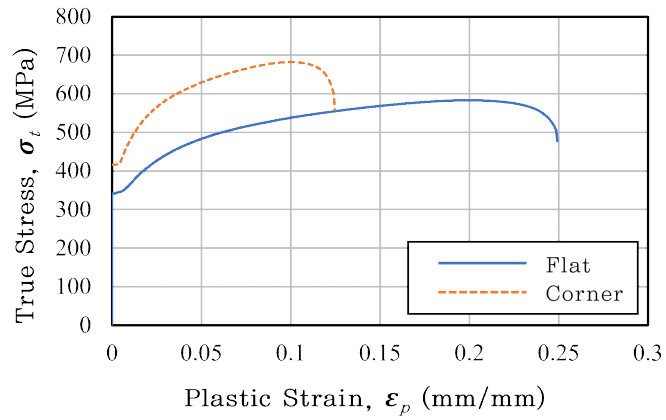


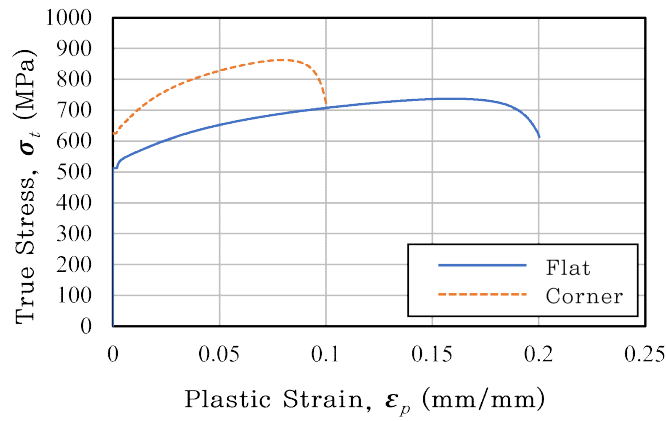
그림 5.4 냉간성형에 의한 재료물성치 변화<sup>[17]</sup>



(a) SSC275 - 1.2 mm



(b) SSC275 - 1.8 mm



(c) SPFH590 - 1.8 mm

그림 5.5 진응력-소성변형률 곡선

### 5.1.3 초기불완전

실험 여건의 한계로 실험체의 실측 치수 및 초기 오차를 측정하지 못하였다. 따라서 실측 치수 및 초기 오차 대신 좌굴형상을 초기불완전 형태로 적용하였다. 해석모델 구성 후, 좌굴해석을 우선 수행하여 1차 좌굴형상(그림 5.6 참조)을 도출하였으며, 초기불완전 형태로 입력 시 그 값은 유효좌굴길이의 1/1000로 하였다. 또한 냉간성형에 의해 잔류응력이 발생하나 잔류응력의 영향에 의한 오차가 크지 않을 것으로 파악하여 고려하지 않았다.<sup>[21]</sup>

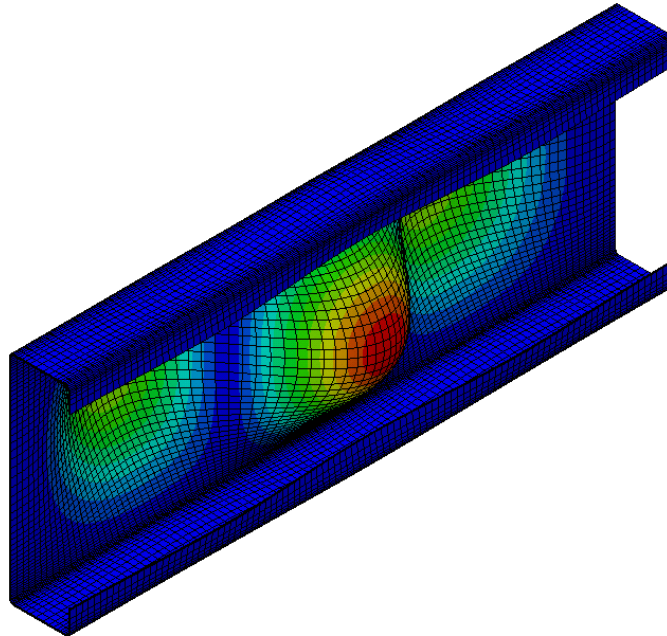


그림 5.6 1차 좌굴모드(실험체 1)

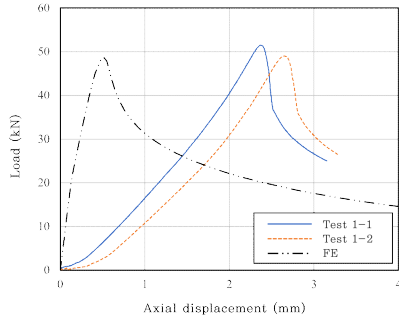
### 5.1.4 해석결과

유한요소해석 결과를 표 5.1 및 그림 5.7, 5.8에 나타냈으며 해석모델의 좌굴형상을 그림 5.9에 나타냈다.  $P_{TEST}$ 는 중심압축실험으로 측정된 최대강도이며,  $P_{FE}$ 는 유한요소해석에 의해 도출된 좌굴강도이다.

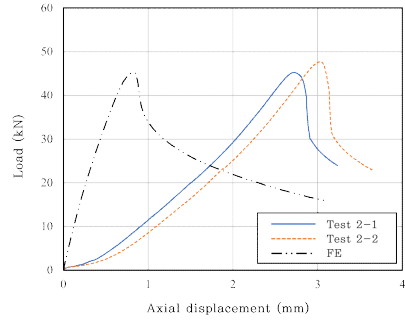


표 5.1 유한요소해석 및 중심압축실험 결과 비교

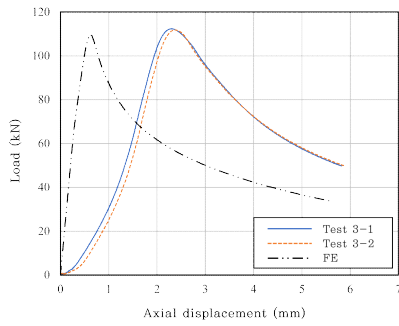
실험체 번호		$P_{TEST}$ (kN)	$P_{FEA}$ (kN)	$\frac{P_{TEST}}{P_{FEA}}$
1	1-1	51.5	48.7	1.06
	1-2	49.0		1.01
2	2-1	45.3	46.4	0.98
	2-2	47.7		1.03
3	3-1	112	110	1.02
	3-2	112		1.02
4	4-1	97.0	103	0.94
	4-2	96.2		0.93
5	5-1	36.8	34.5	1.07
	5-2	35.1		1.02
6	6-1	32.3	32.8	0.98
	6-2	32.1		0.98
7	7-1	80.8	79.7	1.01
	7-2	78.5		0.98
8	8-1	74.9	67.8	1.10
	8-2	71.0		1.05
9	9-1	168	137	1.23
	9-2	166		1.21
10	10-1	135	130	1.04
	10-2	132		1.02
11	11-1	123	122	1.01
	11-2	124		1.02
12	12-1	97.9	96.6	1.01
	12-2	102		1.06
13	13-1	104	82.7	1.26
	13-2	110		1.33
14	14-1	78.0	69.2	1.13
	14-2	83.0		1.20
평균:				1.060
편차:				0.099



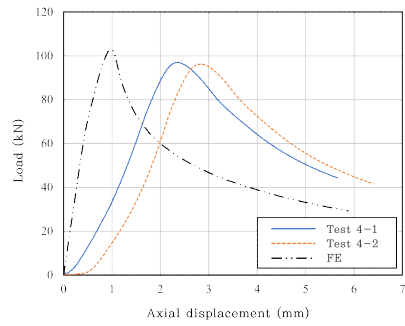
(a) 실험체 1



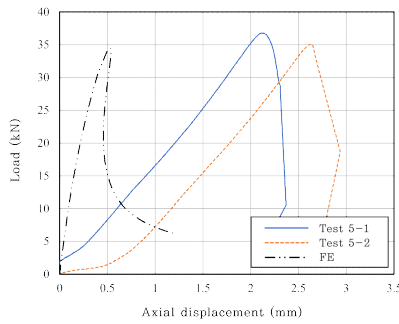
(b) 실험체 2



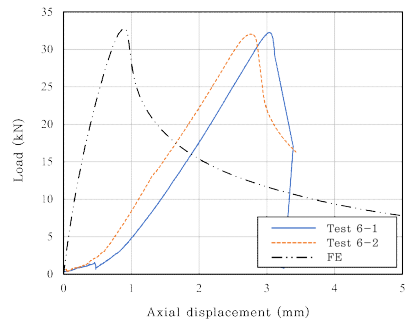
(c) 실험체 3



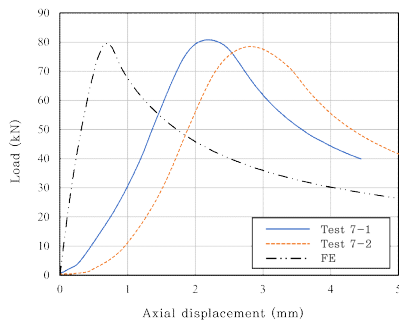
(d) 실험체 4



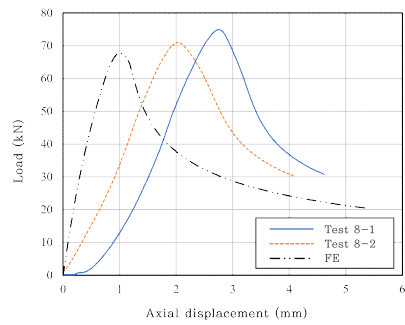
(e) 실험체 5



(f) 실험체 6

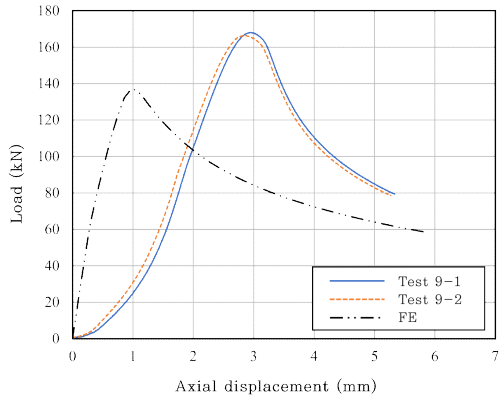


(g) 실험체 7

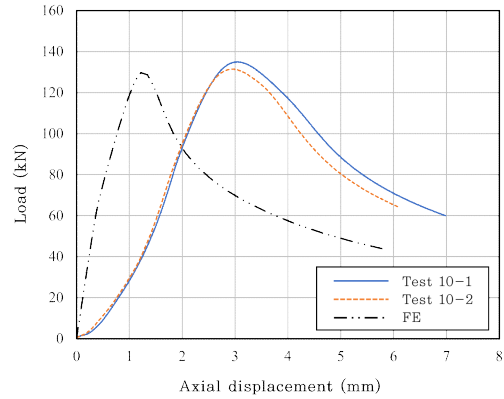


(h) 실험체 8

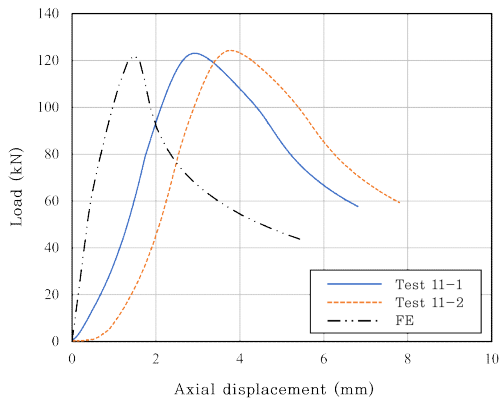
그림 5.7 유한요소해석 및 중심압축실험 결과 비교(SSC275)



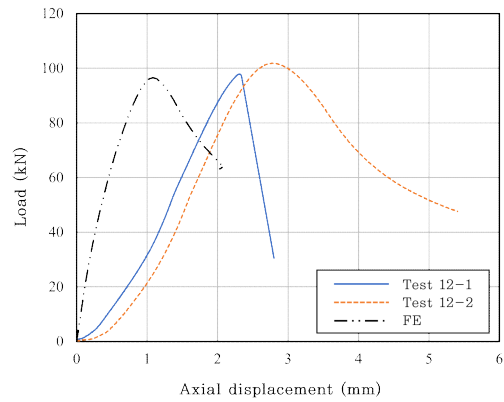
(a) 실험체 9



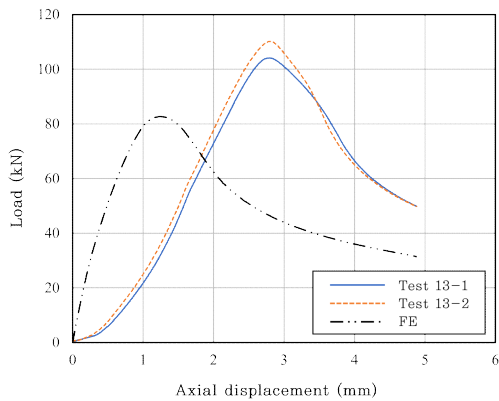
(b) 실험체 10



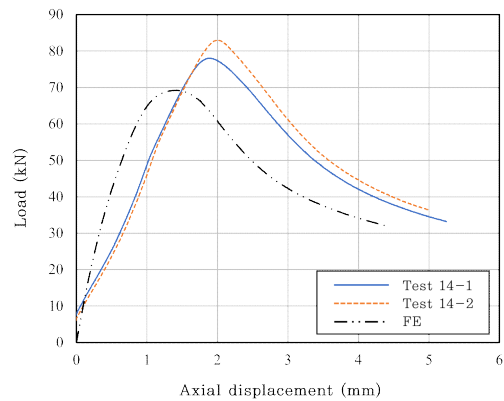
(c) 실험체 11



(d) 실험체 12

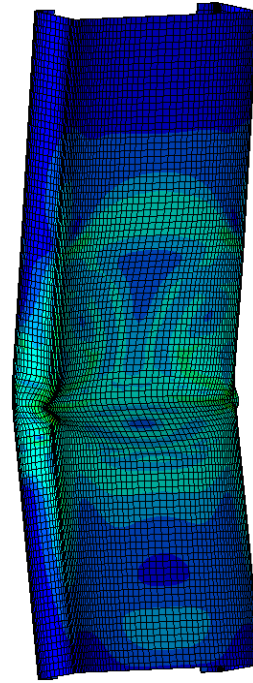


(e) 실험체 13

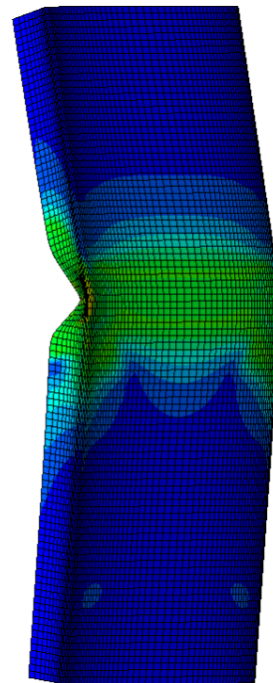


(f) 실험체 14

그림 5.8 유한요소해석 및 중심압축실험 결과 비교(SPFH590)



(a) 립ㄷ형강



(b) 경ㄷ형강

그림 5.9 유한요소해석 및 중심압축실험 결과 비교(좌굴형상)

해석 결과, 초기 거동에서 큰 차이를 보였다. 실험 구성 시 각 단부 지그의 초

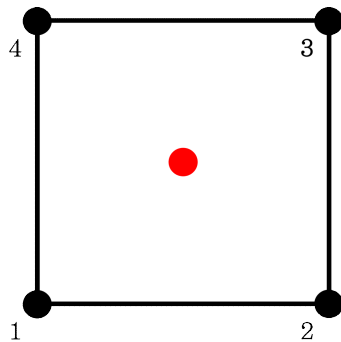
기 구성 오차로 미끄러짐이 발생한 것으로 보인다. 또한 단면 제작 후 단면 치수를 실측하여 해석모델에 반영하지 않았으며, 이로 인해 단면 강성의 오차 및 도심의 차이가 있을 것으로 판단된다. 이 때문에 SPFH590 강재를 사용한 실험체의 강도를 저평가하는 경향을 나타냈다. 그러나 최대강도는 평균 오차 6%로 적절하게 평가하였으므로 유한요소해석 결과는 최대강도 값을 기준으로 평가할 것이다.

## 5.2 유한요소해석모델 수정

### 5.2.1 단순화된 해석모델 구성

앞선 해석모델을 통한 유한요소해석은 다소 많은 시간이 소요된다. 실용적인 유한요소해석을 위해 소요시간을 줄인 모델을 구성하고자 하였다.

앞선 해석모델은 솔리드요소(C3D20R)를 사용하였으나, 냉간성형 부재와 같이 얇은 판을 이용하는 부재는 쉘요소(S4R, 그림 5.10 참조)로 구성하여도 적절한 결과 값을 도출할 수 있었으며, 요소의 크기를 10 mm × 10 mm로 구성하였을 때와 5 mm × 5 mm로 구성하였을 때의 오차는 5 % 이하였다.<sup>[22]</sup> 따라서 해석 시간 단축을 위해 요소의 크기는 10 mm × 10 mm로 구성하였다. 앞선 해석모델에서는 정밀한 해석을 위해 모서리 부분을 세밀하게, 판을 두께 방향으로 더 세밀하게 나누어 주었으나, 이번 해석모델에서는 해석시간 단축을 위해 별도로 나누어주지 않았다. 단순화된 해석모델을 그림 5.11에 나타냈다.



Shell, 4-node, Reduced integration

그림 5.10 쉘요소(S4R)

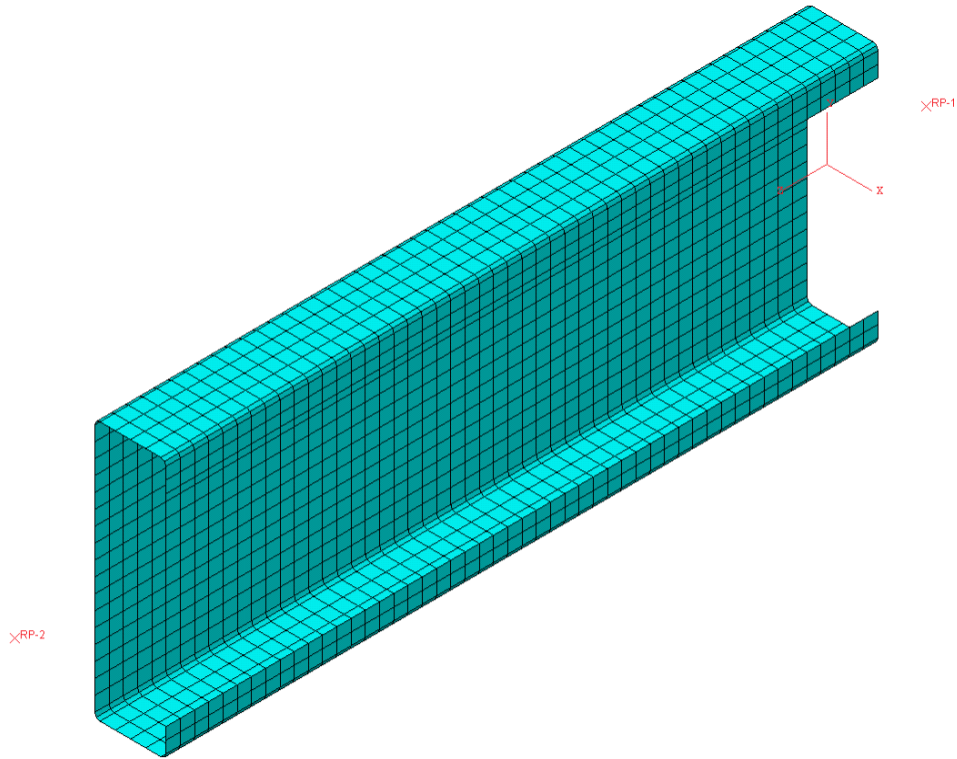
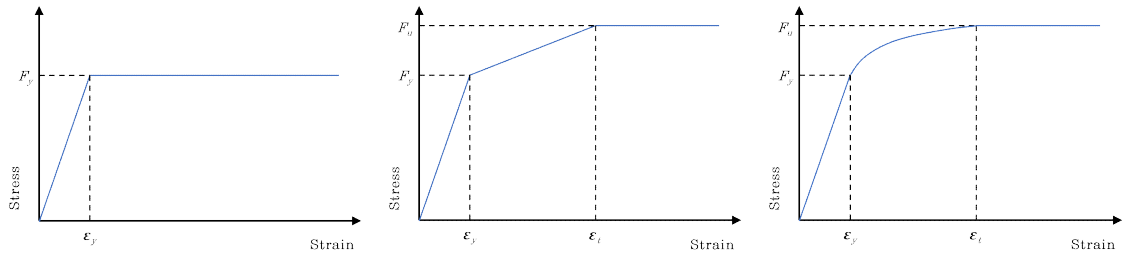


그림 5.11 수정된 해석모델(실험체 1)

## 5.2.2 재료물성치 단순화

재료물성치는 이선형, 삼선형, 비선형 형태(그림 5.12 참조)로 입력할 수 있다. 솔리드요소 해석모델은 정밀한 해석을 위해서 비선형 재료물성치를 사용하였으나, 다소 많은 수치를 입력하여야 하며(약 2000행), 재료물성치를 직관적으로 확인할 수 없다는 단점이 있다(그림 5.13 참조). 또한 이선형 재료물성치는 재료의 변형경화 특성을 반영할 수 없다. 이 연구에서는 실용적인 유한요소해석모델을 위해 항복강도와 인장강도로 이루어진 삼선형 모델을 선택하였다(그림 5.14 참조). 또한 해석모델 단순화를 위해 냉간성형에 의한 강도 증가효과는 고려하지 않았다. 각 해석모델별로 입력된 재료물성치를 표 5.2에 나타냈다. 여기서 인장강도  $F_u$  및 소성변형률  $\epsilon_p$ 는 식 (5-1) ~ (5-3)을 통해 산정된 값이다.



(a) 이선형

(b) 삼선형

(c) 비선형

그림 5.12 재로물성치 형태

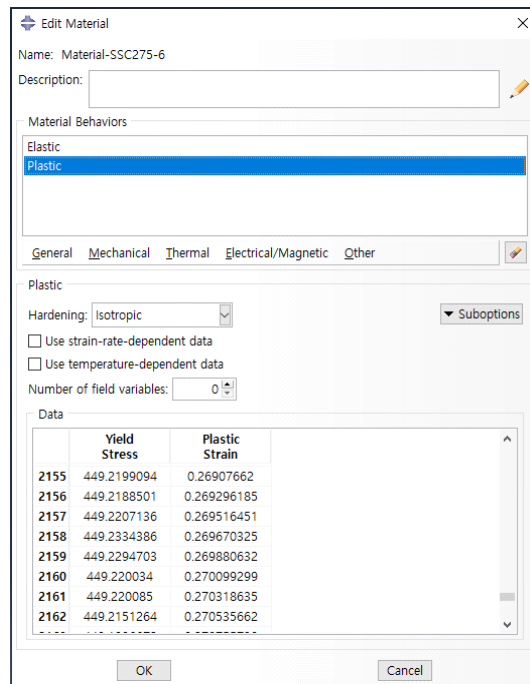


그림 5.13 입력된 비선형 재로물성치(인장강도 449.2 MPa, 입력값 약 2000행)

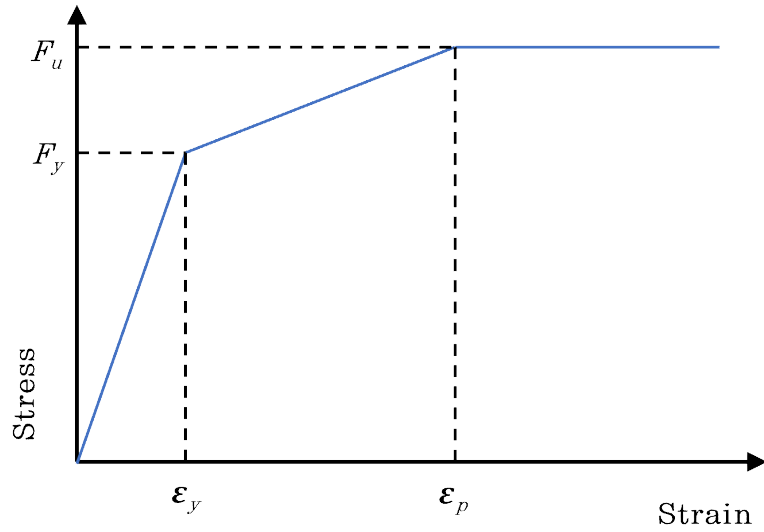


그림 5.14 삼선형 재료물성치

표 5.2 유한요소해석 삼선형 재료물성치

강종		$E$ (MPa)	$F_y$ (MPa)	탄성변형률 $\epsilon_y$	$F_u$ (MPa)	소성변형률 $\epsilon_p$
SSC275	1.2 mm	209,256	264.4	0.0013	449.2	0.2697
	1.8 mm	212,732	341.2	0.0016	583.1	0.1998
SPFH590	1.8 mm	195,410	512.0	0.0026	737.3	0.1590

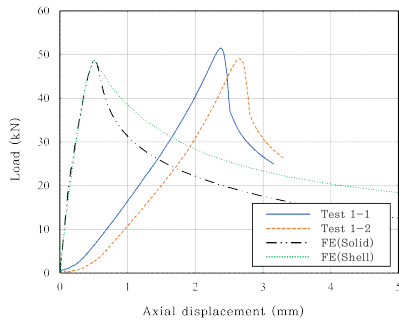
### 5.2.3 해석결과

수정된 해석모델을 이용한 유한요소해석 결과를 표 5.3 및 그림 5.15, 5.16에 나타냈으며 해석모델의 좌굴형상을 그림 5.17에 나타냈다.  $P_{TEST}$ 는 중심압축실험으로 측정된 최대강도다.  $P_{FE,Solid}$ 는 솔리드요소 해석모델을 이용한 유한요소해석 결과이며,  $P_{FE,Shell}$ 는 단순화된 쉘요소 해석모델을 이용한 유한요소해석결과이다.

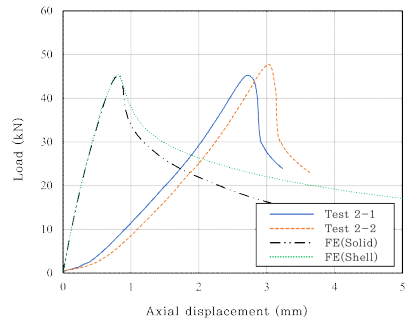


표 5.3 유한요소해석(솔리드 해석모델, 셸 해석모델) 및 중심압축실험 결과 비교

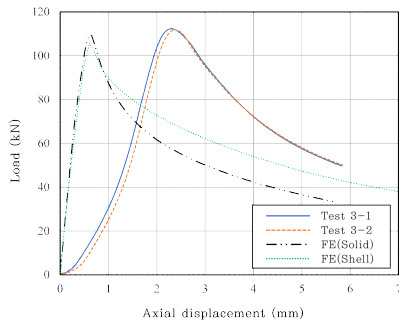
실험체 번호		$P_{TEST}$ (kN)	$P_{FE.Solid}$ (kN)	$P_{FE.Shell}$ (kN)	$\frac{P_{TEST}}{P_{FE.Shell}}$	$\frac{P_{FE.Solid}}{P_{FE.Shell}}$
1	1-1	51.5	48.7	48.9	1.05	1.00
	1-2	49.0			1.00	
2	2-1	45.3	46.4	45.4	1.00	1.02
	2-2	47.7			1.05	
3	3-1	112	110	106	1.06	1.04
	3-2	112			1.06	
4	4-1	97.0	103	96.2	1.01	1.07
	4-2	96.2			1.00	
5	5-1	36.8	34.5	35.0	1.05	0.99
	5-2	35.1			1.00	
6	6-1	32.3	32.8	32.9	0.98	1.00
	6-2	32.1			0.98	
7	7-1	80.8	79.7	79.3	1.02	1.01
	7-2	78.5			0.99	
8	8-1	74.9	67.8	66.9	1.12	1.01
	8-2	71.0			1.06	
9	9-1	168	137	134	1.25	1.02
	9-2	166			1.24	
10	10-1	135	130	127	1.06	1.02
	10-2	132			1.04	
11	11-1	123	122	119	1.03	1.03
	11-2	124			1.04	
12	12-1	97.9	96.6	95.5	1.03	1.01
	12-2	102			1.07	
13	13-1	104	82.7	81.8	1.27	1.01
	13-2	110			1.34	
14	14-1	78.0	69.2	68.4	1.14	1.01
	14-2	83.0			1.21	
평균:					1.077	1.017
편차:					0.098	0.021



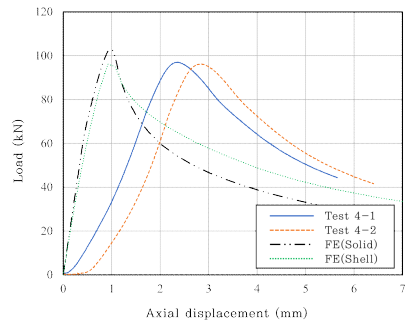
(a) 실험체 1



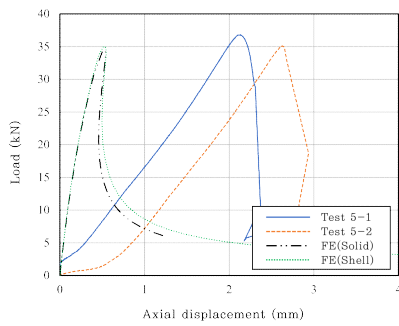
(b) 실험체 2



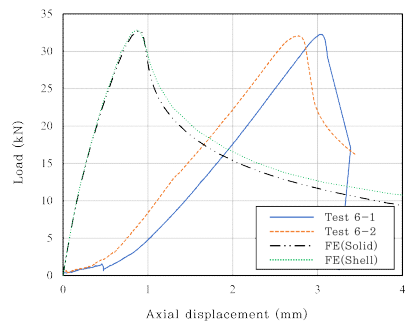
(c) 실험체 3



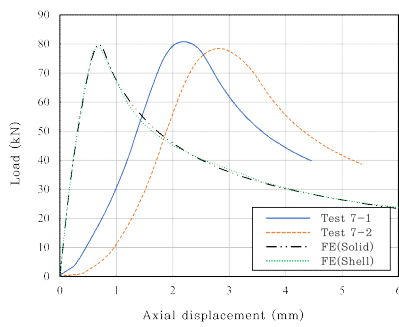
(d) 실험체 4



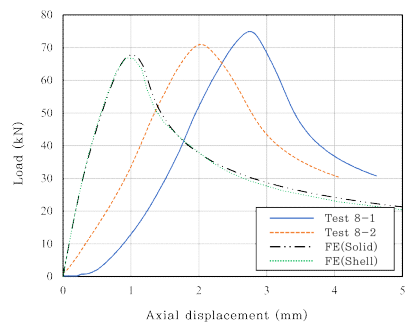
(e) 실험체 5



(f) 실험체 6

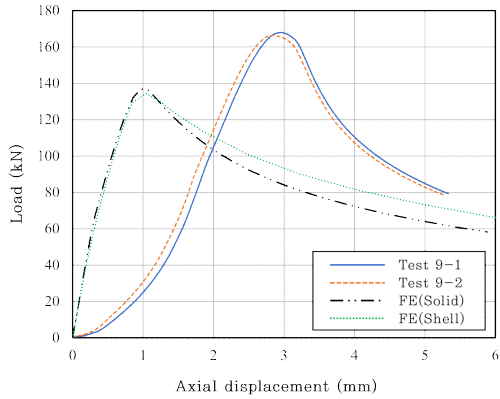


(g) 실험체 7

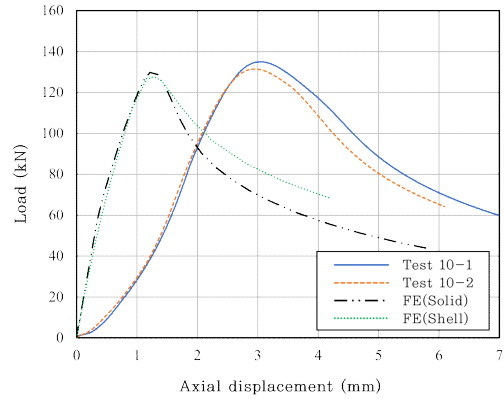


(h) 실험체 8

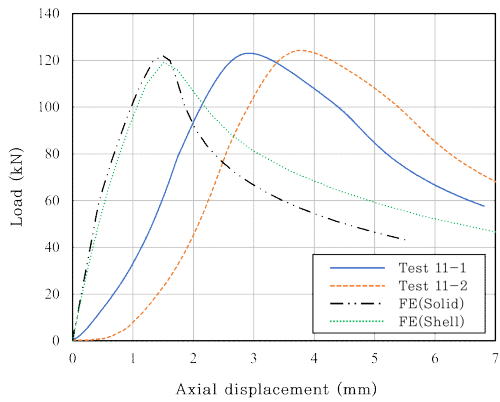
그림 5.15 유한요소해석(수정 모델) 및 중심압축실험 결과 비교(SSC275)



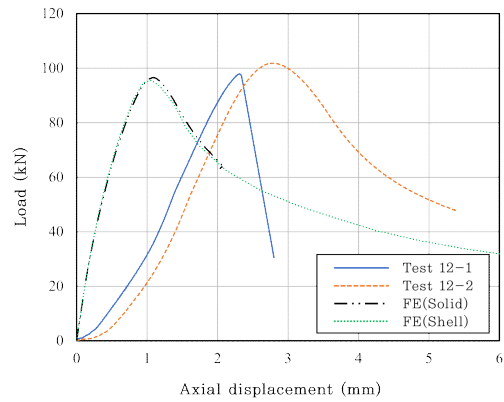
(a) 실험체 9



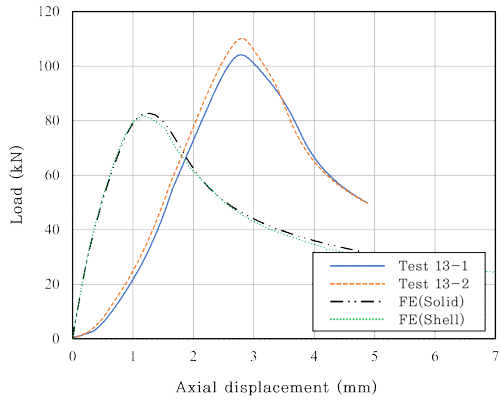
(b) 실험체 10



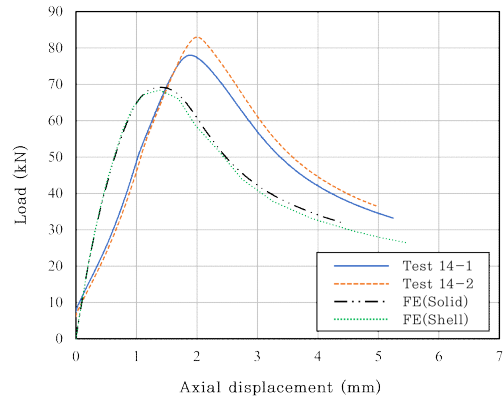
(c) 실험체 11



(d) 실험체 12

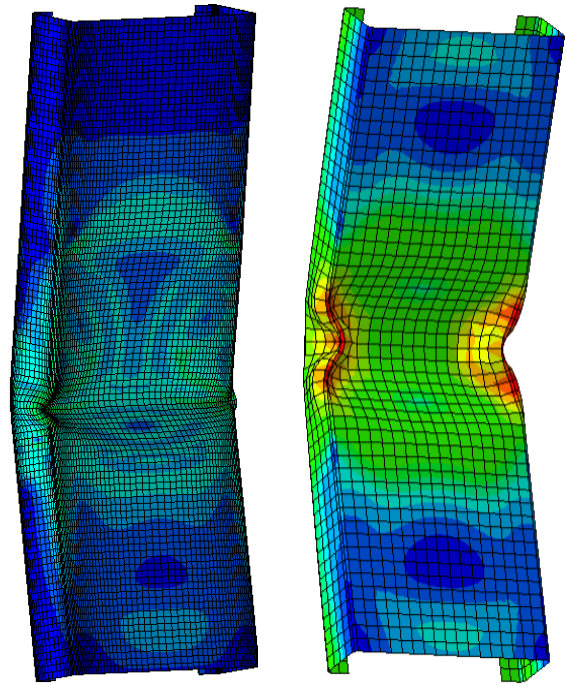


(e) 실험체 13

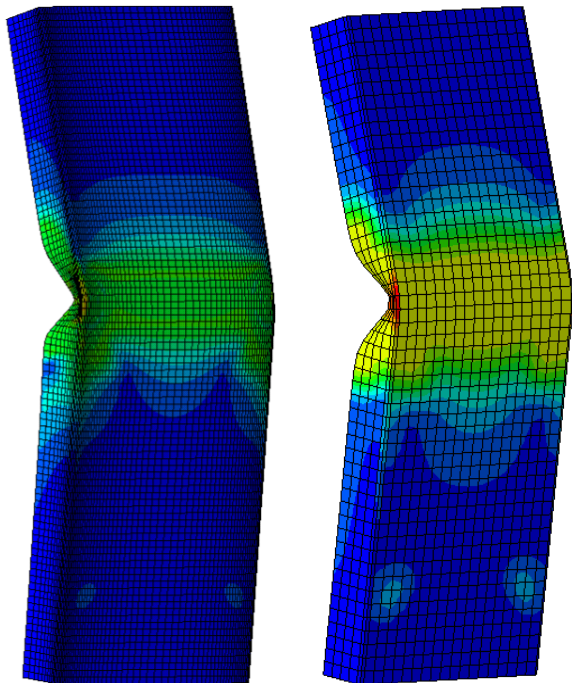


(f) 실험체 14

그림 5.16 유한요소해석(수정 모델) 및 중심압축실험 결과 비교(SPFH590)



(a) 립 $\pi$ 형강



(b) 경 $\pi$ 형강

그림 5.17 유한요소해석(솔리드요소, 쉘요소 모델) 및 중심압축실험 결과 비교(좌굴형상)

솔리드 해석모델의 해석시간은 평균 50분, 쉘요소 해석모델의 해석시간은 평균

3분으로 해석시간을 크게 단축하였다. 립 $\Gamma$ 형강 실험체의 경우, 셸요소 해석모델이 솔리드요소 해석모델보다 좌굴 후 강도를 높게 평가하였다. 또한 좌굴형상 비교 시 웨브-플랜지 모서리 부분에서 거동의 차이를 보인다. 재료물성치 입력 시 솔리드요소는 네킹 후 파단영역까지 반영하였으나, 셸요소는 인장강도영역까지만 반영하였다. 또한 솔리드요소 해석모델 구성 시 각 요소의 크기를 더 세밀하게 구성하였으며 판요소를 두께 방향으로 세밀하게 나누었기 때문에 셸요소 해석모델보다 전체 강성 및 두께 방향 강성을 더 세밀하게 평가한 것으로 판단된다. 반면 경 $\Gamma$ 형강 실험체의 경우, 유사한 좌굴거동을 나타냈다. 실험 결과와 비교 시 평균 오차 8 %로 솔리드요소 해석모델보다 1 % 증가하였으나, 솔리드요소 해석모델 결과와 비교 시 평균 오차 2 %로 유사하게 평가하였다.

### 5.3 유한요소해석 결과

중심압축실험 및 유한요소해석, 수정된 해석모델을 이용한 유한요소해석 결과를 표 5.4(SSC275), 5.5(SPFH590)에 나타냈다.  $P_{TEST}$ 는 중심압축실험으로 측정된 최대강도다.  $P_{FE,Solid}$ 는 기존 해석모델을 이용하여 도출한 유한요소해석 결과이며,  $P_{FE,Shell}$ 은 수정된 해석모델을 이용하여 도출한 유한요소해석 결과이다.

표 5.4 유한요소해석 결과(SSC275)

실험체명	Lipped-C-SSC275-180×50×20-1.2mm(실험체 1, 2)						
유효좌굴길이 (mm)	440	640	940	1340	1840	2440	3140
$P_{TEST}$ (kN)	-	51.5 49.0	45.3 47.7	-	-	-	-
$P_{FE,Solid}$ (kN)	-	48.7	46.4	-	-	-	-
$P_{FE,Shell}$ (kN)	50.1	48.9	45.4	40.0	32.9	24.2	16.6
실험체명	Lipped-C-SSC275-180×50×20-1.8mm(실험체 3, 4)						
유효좌굴길이 (mm)	440	640	940	1340	1840	2440	3140
$P_{TEST}$ (kN)	-	112 112	97.0 96.2	-	-	-	-
$P_{FE,Solid}$ (kN)	-	110	103	-	-	-	-
$P_{FE,Shell}$ (kN)	114	106	96.2	84.6	64.0	43.1	35.2
실험체명	C-SSC275-183×40×40-1.2mm(실험체 5, 6)						
유효좌굴길이 (mm)	440	640	940	1340	1840	2440	3140
$P_{TEST}$ (kN)	-	36.8 35.1	32.3 32.1	-	-	-	-
$P_{FE,Solid}$ (kN)	-	34.5	32.8	-	-	-	-
$P_{FE,Shell}$ (kN)	39.5	35.0	32.9	24.6	15.8	9.70	6.65
실험체명	C-SSC275-184×40×40-1.8mm(실험체 7, 8)						
유효좌굴길이 (mm)	440	640	940	1340	1840	2440	3140
$P_{TEST}$ (kN)	-	80.8 78.5	74.9 71.0	-	-	-	-
$P_{FE,Solid}$ (kN)	-	79.7	67.8	-	-	-	-
$P_{FE,Shell}$ (kN)	86.5	79.3	66.9	45.1	27.7	16.6	10.4

표 5.5 유한요소해석 결과(SPFH590)

실험체명	Lipped-C-SPFH590-180×50×20-1.8mm(실험체 9, 10, 11)							
유효좌굴길이 (mm)	440	640	790	940	1340	1840	2440	3140
$P_{TEST}$ (kN)	-	168	135	123	-	-	-	-
$P_{FE,Solid}$ (kN)	-	166	132	124	-	-	-	-
$P_{FE,Solid}$ (kN)	-	137	130	122	-	-	-	-
$P_{FE,Shell}$ (kN)	146	134	127	119	93.8	64.7	41.2	32.3
실험체명	C-SPFH590-184×40×40-1.8mm(실험체 12, 13, 14)							
유효좌굴길이 (mm)	440	640	790	940	1340	1840	2440	3140
$P_{TEST}$ (kN)	-	97.9	104	79.0	-	-	-	-
$P_{FE,Solid}$ (kN)	-	102	110	83.0	-	-	-	-
$P_{FE,Solid}$ (kN)	-	96.6	82.7	69.2	-	-	-	-
$P_{FE,Shell}$ (kN)	109	95.5	81.8	68.4	41.6	25.4	15.3	9.53

## VI. 설계기준 압축강도와 실험 및 해석결과 비교

각 실험체별 단면규격을 대상으로 냉간성형강 설계기준(유효폭법, 직접강도법)과 강구조 부재설계기준(KDS 14 31 10)을 통해 설계압축강도를 산정하였다. 단면 물성치는 AISI Manual-Cold-Formed Steel Design<sup>[23]</sup>에서 제시하는 수식을 이용하였다. 강제 시편시험 결과를 통해 냉간성형강 설계기준(KDS 41 30 30)을 별도의 제한 없이 적용할 수 있음을 확인하였으므로 설계강도 산정 시 재료강도를 그대로 적용할 수 있다. 설계기준에서 제시하는 식에 따라 냉간성형에 의해 증가되는 항복강도를 산정한 결과, 증가량은 5% 이내였다. 또한 설계기준 압축강도 산정 과정에서 냉간성형에 의해 감소되는 연성능력을 반영하지 않기 때문에 주의를 요한다.<sup>[1]</sup> 따라서 항복강도 증가 효과는 고려하지 않았다. 유한요소해석을 활용하여 확인한 결과, 부재길이와 유효좌굴길이의 차이로 인해 나타나는 오차는 2%내외였다. 따라서 설계강도 산정 시 유효좌굴길이를 사용하였다. 설계압축강도 산정 시 유효길이는 30 mm에서 3,300 mm까지 가정하였다.

실험결과 및 해석결과(솔리드요소 해석모델), 설계기준 압축강도를 비교한 것을 표 6.1에 나타냈으며, 해석결과(셸요소 해석모델), 설계기준 압축강도를 비교한 것을 표 6.2(SSC275-Lipped-C), 6.3(SSC275-C), 6.4(SPFH590)에 나타냈다. 유한요소해석 결과(수정된 해석모델) 및 중심압축실험 결과, 설계강도 산정 결과 그래프를 그림 6.1(SSC275-Lipped-C), 6.2(SSC275-C), 6.3(SPFH590)에 나타냈다. SP는 중심압축실험 결과이며 FEA는 유한요소해석 결과(수정된 해석모델), DSM(직접강도법) 및 EWM(유효폭법), KDS14(강구조 부재 설계기준)는 설계기준 압축강도 산정 결과다. 여기서 그림 6.3-(a)의 Distortional은 단면형상변형에 의한 좌굴이 지배적이라고 평가한 강도다. 그 외 실험체는 항복 및 전체좌굴과 상호작용하는 국부좌굴이 지배적이라고 평가하였다.

유효폭법으로 산정된 설계기준 압축강도 중 스티프너 보강된  $\pi$ 형강(Lipped-C)의 경우, 중심압축실험 및 유한요소해석 결과에 대해 다소 과대평가하였다. 경  $\pi$ 형강(C)의 경우, 중심압축실험 및 유한요소해석 결과에 대해 안전측으로 평가하였다. 중심압축실험 결과와 비교 시 평균 오차 8%, 편차 19%, 유한요소해석 결과와 비교 시 평균 오차 2%, 편차 13%의 차이를 보였다. 다소 편차가 발생하였으나, 선행 연구결과<sup>[3,4,5,6,7,8,10]</sup>에서 또한 나타난 수준의 오차였으므로 적절하게 평가하였다고 판단된다.

직접강도법으로 산정된 설계기준 압축강도는 전체적으로 안전측으로 평가하였



다. 경ㄷ형강(C)의 경우 유효폭법과 유사한 결과를 나타냈다. 중심압축실험 결과와 비교 시 평균 오차 24 %, 편차 11 %, 유한요소해석 결과와 비교 시 평균 오차 10 %, 편차 9 %의 차이를 보였다. 유효폭법과 동일하게 발생가능한 오차였으며 안전측 설계이므로 적절하게 평가하였다고 판단된다.

강구조 부재설계기준(KDS 14 31 10)으로 산정된 설계기준 압축강도 중 비세장판과 세장판이 조합된 스티프너 보강된 ㄷ형강(Lipped-C) 실험체의 경우, 중심압축실험 및 유한요소해석 결과에 대해 과대평가하였다. 세장판으로만 구성된 경ㄷ형강(C) 실험체의 경우 중심압축실험 및 유한요소해석 결과에 대해 안전측으로 평가하였다. 중심압축실험 결과와 비교 시 평균 오차 18 %, 편차 36 %, 유한요소해석 결과와 비교 시 평균 오차 0 %, 편차 29 % 로 가장 큰 편차를 보였다.

표 6.1 중심압축실험 및 해석결과, 설계강도산정 결과비교

실험체 번호	$P_{TEST}$ (kN)	$P_{FEA}$ (kN)	$P_{EWM}$ (kN)	$P_{DSM}$ (kN)	$P_{KDS14}$ (kN)	$\frac{P_{TEST}}{P_{FEA}}$	$\frac{P_{TEST}}{P_{EWM}}$	$\frac{P_{TEST}}{P_{DSM}}$	$\frac{P_{TEST}}{P_{KDS14}}$	
1	1-1	51.5	48.7	56.8	39.9	58.8	1.06	0.91	1.19	0.88
	1-2	49.0					1.01	0.86	1.23	0.83
2	2-1	45.3	46.4	54.0	38.1	56.2	0.98	0.84	1.19	0.81
	2-2	47.7					1.03	0.88	1.25	0.85
3	3-1	112	110	122	94.1	124	1.02	0.92	1.19	0.90
	3-2	112					1.02	0.92	1.19	0.90
4	4-1	97.0	103	112	88.6	116	0.94	0.87	1.09	0.84
	4-2	96.2					0.93	0.86	1.09	0.83
5	5-1	36.8	34.5	30.0	30.5	21.1	1.07	1.23	1.21	1.74
	5-2	35.1					1.02	1.17	1.15	1.66
6	6-1	32.3	32.8	26.5	26.7	20.0	0.98	1.22	1.21	1.62
	6-2	32.1					0.98	1.21	1.20	1.61
7	7-1	80.8	79.7	72.5	70.7	67.1	1.01	1.11	1.14	1.20
	7-2	78.5					0.98	1.08	1.11	1.17
8	8-1	74.9	67.8	61.2	59.5	59.1	1.10	1.22	1.26	1.27
	8-2	71.0					1.04	1.16	1.19	1.20
9	9-1	168	137	148	114	167	1.23	1.14	1.47	1.01
	9-2	166					1.21	1.12	1.46	0.99
10	10-1	135	130	148	109	159	1.04	0.91	1.24	0.85
	10-2	132					1.02	0.89	1.21	0.83
11	11-1	123	122	142	104	151	1.01	0.87	1.18	0.81
	11-2	124					1.02	0.87	1.19	0.82
12	12-1	97.9	96.6	82.6	80.9	63.9	1.01	1.19	1.21	1.53
	12-2	102					1.06	1.23	1.26	1.60
13	13-1	104	82.7	73.1	71.4	60.2	1.26	1.42	1.46	1.73
	13-2	110					1.33	1.50	1.54	1.83
14	14-1	78.0	69.2	62.9	61.3	56.0	1.13	1.24	1.27	1.39
	14-2	83.0					1.20	1.32	1.35	1.48
평균:							1.06	1.08	1.24	1.18
편차:							0.10	0.19	0.11	0.36

표 6.2 해석결과(셀요소 해석모델) 및 설계강도산정 결과비교(SSC275-Lipped-C)

실험체명		Lipped-C-SSC275-180×50×20-1.2mm					
유효좌굴길이 (mm)	$P_{FE,Shell}$ (kN)	$P_{EWM}$ (kN)	$P_{DSM}$ (kN)	$P_{KDS14}$ (kN)	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{EWM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{DSM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{KDS14}}$
440	50.1	58.1	40.8	60.0	0.86	1.23	0.84
640	48.9	56.8	39.9	58.8	0.86	1.23	0.83
940	45.4	54.0	38.1	56.2	0.84	1.19	0.81
1340	40.0	49.0	34.9	51.5	0.82	1.15	0.78
1840	32.9	39.9	29.9	44.3	0.82	1.10	0.74
2440	24.2	28.7	23.2	34.6	0.84	1.04	0.70
3140	16.6	18.9	16.8	23.9	0.88	0.99	0.69
평균:					0.85	1.13	0.77
편차:					0.02	0.09	0.06
실험체명		Lipped-C-SSC275-180×50×20-1.8mm					
유효좌굴길이 (mm)	$P_{FE,Shell}$ (kN)	$P_{EWM}$ (kN)	$P_{DSM}$ (kN)	$P_{KDS14}$ (kN)	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{EWM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{DSM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{KDS14}}$
440	114	126	96.7	128	0.90	1.18	0.89
640	106	122	94.1	124	0.87	1.13	0.85
940	96.2	112	88.6	116	0.86	1.09	0.83
1340	84.6	96.6	78.9	102	0.88	1.07	0.83
1840	64.0	74.5	64.4	82.1	0.86	0.99	0.78
2440	43.1	49.5	46.5	57.6	0.87	0.93	0.75
3140	35.2	32.7	33.1	35.3	1.08	1.06	1.00
평균:					0.90	1.06	0.85
편차:					0.08	0.08	0.08

표 6.3 해석결과(셀요소 해석모델) 및 설계강도산정 결과비교(SSC275-C)

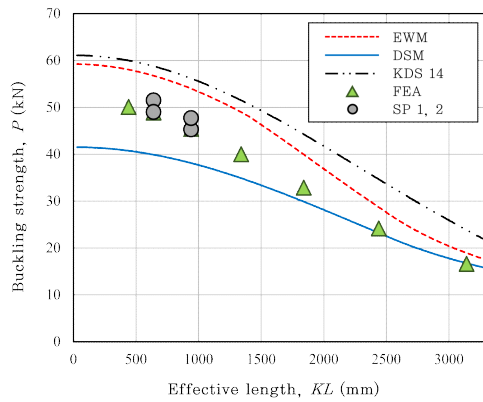
실험체명		C-SSC275-183×40×40-1.2mm					
유효좌굴길이 (mm)	$P_{FE,Shell}$ (kN)	$P_{EWM}$ (kN)	$P_{DSM}$ (kN)	$P_{KDS14}$ (kN)	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{EWM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{DSM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{KDS14}}$
440	39.5	31.7	32.3	21.7	1.25	1.22	1.82
640	35.0	30.0	30.5	21.1	1.17	1.15	1.66
940	32.9	26.5	26.7	20.0	1.24	1.23	1.65
1340	24.6	20.7	20.7	17.9	1.19	1.19	1.37
1840	15.8	14.2	13.9	14.8	1.11	1.14	1.07
2440	9.70	9.65	9.60	10.9	1.01	1.01	0.89
3140	6.65	6.50	6.82	6.93	1.02	0.98	0.96
평균:					1.14	1.13	1.35
편차:					0.10	0.10	0.38
실험체명		C-SSC275-184×40×40-1.8mm					
유효좌굴길이 (mm)	$P_{FE,Shell}$ (kN)	$P_{EWM}$ (kN)	$P_{DSM}$ (kN)	$P_{KDS14}$ (kN)	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{EWM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{DSM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{KDS14}}$
440	86.5	78.3	76.4	71.1	1.10	1.13	1.22
640	79.3	72.5	70.7	67.1	1.09	1.12	1.18
940	66.9	61.2	59.5	59.1	1.09	1.12	1.13
1340	45.1	43.7	42.6	46.3	1.03	1.06	0.97
1840	27.7	27.2	27.9	30.3	1.02	0.99	0.91
2440	16.6	17.3	17.3	17.3	0.96	0.96	0.96
3140	10.4	10.4	10.4	10.4	1.00	1.00	1.00
평균:					1.04	1.06	1.05
편차:					0.06	0.07	0.12

표 6.4 해석결과(셸요소 해석모델) 및 설계강도산정 결과비교(SPFH590)

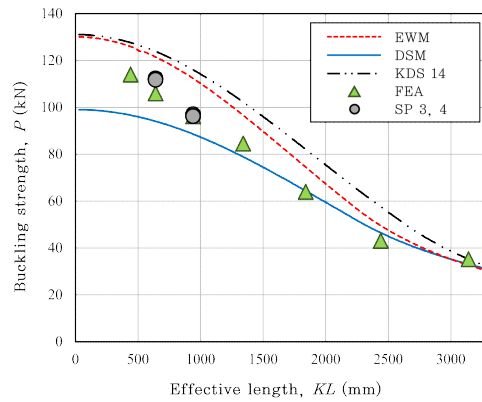
Lipped-C-SPFH590-180×50×20-1.8mm							
실험체명	$P_{FE,Shell}$	$P_{EWM}$	$P_{DSM}$	$P_{KDS14}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{EWM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{DSM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{KDS14}}$
유효좌굴길이 (mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)			
440	146	153	119	174	0.95	1.23	0.84
640	134	148	114	167	0.91	1.18	0.80
790	127	148	109	159	0.86	1.17	0.80
940	119	142	104	151	0.84	1.14	0.79
1340	93.8	111	86.0	125	0.85	1.09	0.75
1840	64.7	72.4	61.8	89.6	0.79	1.05	0.72
2440	41.2	45.5	42.7	53.7	0.91	0.96	0.87
3140	32.3	30.0	30.5	32.4	1.08	1.06	1.00
				평균:	0.91	1.11	0.81
				편차:	0.08	0.08	0.08

C-SPFH590-184×40×40-1.8mm							
실험체명	$P_{FE,Shell}$	$P_{EWM}$	$P_{DSM}$	$P_{KDS14}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{EWM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{DSM}}$	$\frac{P_{FE,Shell}}{P_{KDS14}}$
유효좌굴길이 (mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)			
440	109	93.4	91.8	67.8	1.17	1.19	1.61
640	95.5	82.6	80.9	63.9	1.16	1.18	1.49
790	81.8	73.1	71.4	60.2	1.12	1.15	1.36
940	68.4	62.9	61.3	56.0	1.09	1.12	1.22
1340	41.6	40.2	39.1	43.4	1.03	1.06	0.96
1840	25.4	25.0	25.6	27.9	1.02	0.99	0.91
2440	15.3	15.9	15.9	15.9	0.96	0.96	0.96
3140	9.53	9.58	9.58	9.58	0.99	0.99	0.99
				평균:	1.07	1.08	1.19
				편차:	0.08	0.09	0.27

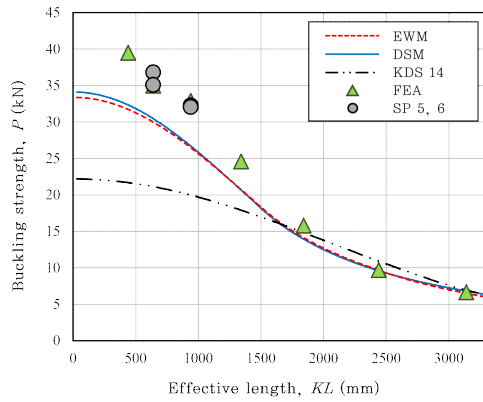


(a) 180×50×20-1.2mm

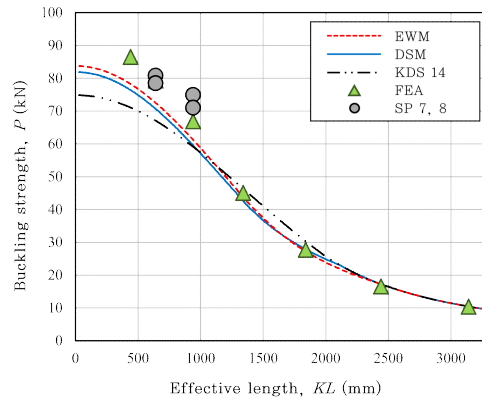


(b) 180×50×20-1.8mm

그림 6.1 최종결과비교(SSC275-Lipped-C)

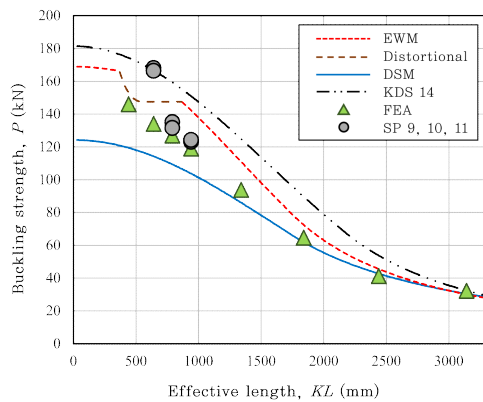


(a) 183×40×40-1.2mm

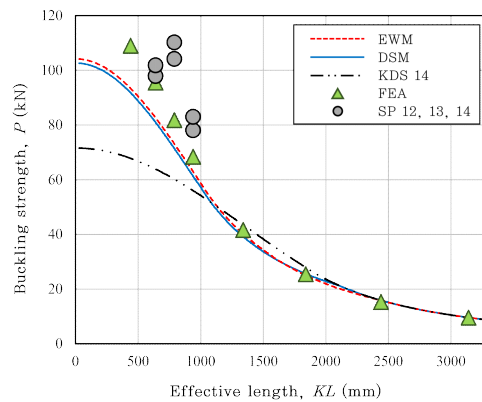


(b) 184×40×40-1.8mm

그림 6.2 최종결과비교(SSC275-C)



(a) Lipped-C-180×50×20-1.8mm



(b) C-184×40×40-1.8mm

그림 6.3 최종결과비교(SPFH590)

## VII. 결 론

중심압축실험을 통한 압축강도 측정값, 유한요소해석 결과값, 유효폭법과 직접강도법, 강구조 부재설계기준(KDS 14 31 10)을 통한 설계기준 압축강도 산정 결과를 비교하여 국내 냉간성형용 강재를 대상으로 냉간성형강 설계기준의 적합성을 확인하였다.

강구조 부재설계기준(KDS 14 31 10)을 이용하여 냉간성형 압축부재의 강도를 산정하였을 때, 전체적으로 다소 낮은 오차를 보였으나 이는 과대평가 결과와 과소평가 결과가 적절하게 나타났기 때문이었다. 편차 약 30 %로 전혀 일관적이지 않은 평가를 하였다. 때문에 냉간성형 부재 설계 시, 강구조 부재설계기준을 이용하는 것은 적절하지 못함을 확인하였다.

유효폭법과 직접강도법을 이용하여 냉간성형 압축부재의 강도를 산정하였을 때, 다소 오차가 발생하였다. 그러나 선행 연구결과를 참고하였을 때 유사한 수준의 오차였다. 따라서 냉간성형 부재의 설계방법은 KDS 41 30 30을 이용하는 것이 바람직함을 증명하였다. 또한 강도 산정 시 KDS 41 30 30에서 제시하는 연신을 제한조건에 따라 항복강도를 적용하였기 때문에 제한조건 또한 적절함을 증명하였다.

이번 연구는 중심축압축을 받는 부재에 대해서만 평가하였으며, 향후 휨-압축을 동시에 받는 경우에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 대한건축학회 (1999), “냉간성형강 구조설계기준”, 대한건축학회
2. 대한건축학회 (2022), “냉간성형강 설계기준”, 대한건축학회
3. B.W.Schafer (2000), “Distortional Buckling of Cold-formed Steel Columns”, The American Iron and Steel Institute
4. B.W.Schafer (2007), “Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design”, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64, pp.766~778
5. Yan Lu, Tianhua Zhou, Wenchao Li, Hanheng Wu (2017), “Experimental investigation and a novel direct strength method for cold-formed built-up I-section columns”, Thin-Walled Structures, Vol. 112, pp.125~139
6. 신태송, 이정호 (2006), “냉간성형강 부재의 압축과 휨모멘트 조합내력 평가”, 대한건축학회논문집 구조계, 제22권, 제5호, pp.113-20
7. 최인락, 이경률 (2020), “직접강도법과 유효폭법에 따른 냉간성형 휨부재 휨강도 평가”, 공업기술연구 논문집, 제40권, 제1호, pp.59-66
8. 류승완, 박성웅, 권영봉 (2015), “용접형강의 직접강도법 개발에 관한 연구 고찰”, 한국강구조학회 논문집, 제27권, 제2호, pp.231~241
9. 강현구, 김태수 (2022), “중심압축력을 받는 냉간성형 탄소강 각형강관 압축재의 좌굴거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 제38권, 제10호, pp.273~282
10. 조봉호, 이철호 (2022), “냉간성형강 설계기준(KDS 41 30 30) 소개”, 한국강구조학회지, 제34권, 제3호, pp.16-20
11. 대한건축학회 (2019), “강구조 부재설계기준(하중저항계수설계법)”, 대한건축학회
12. British Standards Institution (2010), “Eurocode 3: design of steel structures”, BSI, London
13. British Standards Institution (2006), “Eurocode 3: design of steel structures - part 1-5: General rules - Plated structural elements”, BSI,



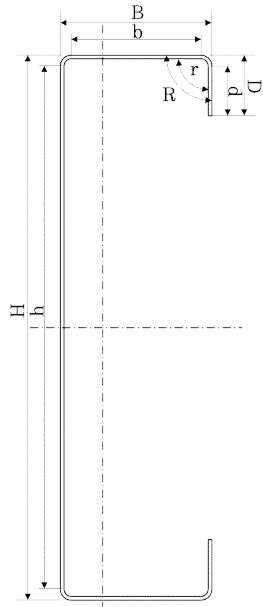
London

14. British Standards Institution (2006), “Eurocode 3: design of steel structures - part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting”, BSI, London
15. American Iron and Steel Institute (2016), “North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2016 Edition”, AISI-Specifications, Standards, Manual and Research Reports
16. Ashraf, M., Gardner, L., Nethercot, D.A. (2005), “Strength Enhancement of Corners Regions of Stainless Steel Cross Sections”, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61(1), pp.37~52
17. Kenneth W Karren, M. M. Gohil (1971), “Effects of Strain Hardening and Aging on Corner Properties of Cold-Formed Steel Shapes”, International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures 1
18. 강현구, 나창순 (2014), “냉간성형강재의 전체좌굴 및 뒤틀림좌굴에 대한 비선형유한요소해석”, 한국전산구조공학회 논문집, 제27권, 제2호, pp.79~86
19. ABAQUS (2007), “User’s Manual”, Version 6.7, Hibbitt. Kalsson & Sorenson, HKS Inc., RI
20. JHancock, G.G., Murray, T.M., Ellifritt, D.S. (2001), “Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification”, Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
21. Jun Ye, Seyed Mohammad Mojtabaei, Iman Hajirasouliha, Paul Shepherd, Kypros Pilakoutas (2018), “Strength and deflection behaviour of cold-formed steel back-to-back channerls”, Engineering structures, Vol. 117, pp.641-654
22. Xingyou Yao, Yafei Liu, Shile Zhang, Yanli Guo, Chengli Hu (2022), “Experiment and Design Method of Clod-Formed Thin-Walled Steel Double-Lipped Equal-Leg Angle under Axial Compression”, Buildings, Vol. 12(11)
23. American Iron and Steel Institute (2003), “AISI Manual Cold-Formed Steel Design 2002 Edition”, AISI-Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members

## VIII. 부 록

### A 공칭축강도 산정과정 예제(냉간성형강 구조설계기준: ASD)

표 A.1 예제 규격

강종	단면 (mm)	두께 (mm)	길이 (mm)
SSC275 $F_y: 264 \text{ MPa}$ $E: 209,256 \text{ MPa}$	 <p style="margin-left: 20px;"> <math>\ast H, B, D : \text{외측길이}</math>  <math>h, b, d : \text{모서리 제외 길이}</math>  <math>R, r : \text{모서리의 반경}</math> </p> <p style="margin-left: 20px;"> <math>H \times B \times D = 180 \times 50 \times 20</math>  <math>h \times b \times d = 172.8 \times 42.8 \times 16.4</math>  <math>R = 3.6, r = 2.4</math> </p>	1.2	500 (640)

#### 3.1 판폭두께비 제한

$$h/t = 144 \leq 500 \text{ O.K}$$

$$b/t = 35.67 \leq 60 \text{ O.K}$$

$$d/t = 13.67 \leq 60 \text{ O.K}$$

#### 3.5 압축재

##### 3.5.1 허용압축강도

- 1) 비틀림 또는 휨비틀림좌굴의 영향을 받지 않는 단면

$$F_e = \frac{\pi^2 \times 209,256}{(1 \times 640/18.69)^2} = 1,761 \text{ MPa}$$

2) 비틀림 또는 휨비틀림좌굴에 영향을 받는 1축 또는 2축 대칭 단면

$$r_o = \sqrt{68.68^2 + 18.69^2 + 35.32^2} = 79.46$$

$$\beta = 1 - (-35.32/79.46)^2 = 0.8024$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 \times 209,256}{(1 \times 640/68.68)^2} = 23,785 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{372.1 \times 79.46^2} \times \left[ 80,483 \times 175.3 + \frac{\pi^2 \times 209,256 \times 9.17 \times 10^8}{(1 \times 640)^2} \right] = 1,974 \text{ MPa}$$

$$F_e = \frac{1}{2 \times 0.8024} \times \left[ (23,785 + 1,974) - \sqrt{(23,785 + 1,974)^2 - 4 \times 0.8024 \times 23,785 \times 1,974} \right]$$

$$= 1,940 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow F_e(\text{MIN}) = 1,761 \text{ MPa}$$

$$F_e = 1,761 > 264/2 = 132$$

$$\Rightarrow F_n = 264 \times \{1 - 264/(4 \times 1,761)\} = 254.1 \text{ MPa}$$

$$\therefore P_{ne} = 372.1 \times 254.1 = 94.55 \text{ kN}$$

## 3.2 유효폭

### 3.2.1 유효폭의 기본식

#### 3.2.2 균일압축을 받는 압축재의 강절판요소

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{4}} \times \left( \frac{172.8}{1.2} \right) \times \sqrt{\frac{254.1}{209,256}} = 2.639 > 0.673$$

$$\Rightarrow \rho = (1 - 0.22/2.639)/2.639 = 0.3473$$

$$\therefore b = 0.3473 \times 172.8 = 60.01 \text{ mm}$$

#### 3.2.4 균일압축을 받는 압축재 또는 휨재의 비강절판요소

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{0.43}} \times \left( \frac{16.4}{1.2} \right) \times \sqrt{\frac{254.1}{209,256}} = 0.764 > 0.673$$

$$\Rightarrow \rho = (1 - 0.22/0.764)/0.764 = 0.9320$$

$$\therefore b = 0.9320 \times 16.4 = 15.28 \text{ mm}$$

3.2.5 균일압축응력을 받는 반강절판요소

$$S = 1.28 \times \sqrt{209,256/254.1} = 36.73$$

$$I_S = (16.4^3 \times 1.2)/12 = 441.1$$

$$w/t = 42.8/1.2 = 35.67 < 36.73$$

$$\Rightarrow I_a = 399 \times \left( \frac{42.8/1.2}{36.73} - 0.33 \right)^3 \times 1.2^4 = 218.0$$

$$\Rightarrow n = 1/2 = 0.5$$

$$D/w = 20/42.8 = 0.4673 \leq 0.8$$

$$k = [4.82 - 5 \times (20/42.8)] \times (441.1/218.0)^{0.5} + 0.43 = 3.963 \\ \leq 5.25 - 5 \times (20/42.8) = 2.914 \text{ O.K}$$

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{2.914}} \times \left( \frac{42.8}{1.2} \right) \times \sqrt{\frac{264}{209,256}} = 0.781 > 0.673$$

$$\Rightarrow \rho = (1 - 0.22/0.781)/0.781 = 0.9197$$

$$\therefore b = 0.9197 \times 42.8 = 39.36 \text{ mm}$$

$$w/t = 42.8/1.2 = 35.67 > 36.73/3 = 12.24$$

$$\therefore d_s = 15.28 \times (441.1/218) = 30.92 \text{ mm} \leq 15.28 \text{ mm O.K}$$

$$b = 39.36 \text{ mm}$$

$$A_e = (60.01 + 39.36 \times 2 + 15.28 \times 2) \times 1.2 + \pi \times (3.6^2 - 2.4^2) = 225.8 \text{ mm}^2$$

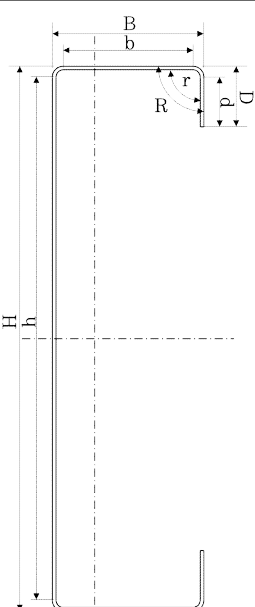
3.5 압축재

3.5.1 허용압축강도

$$\therefore P_{ne} = 225.8 \times 254.1 = 57.38 \text{ kN}$$

## B 공칭축강도 산정과정 예제(KDS 41 30 30)

표 B.1 예제 규격

강종	단면 (mm)	두께 (mm)	길이 (mm)
SSC275 $F_y$ : 264 MPa $E$ : 209,256 MPa	 <p> <math>\ast H, B, D</math>: 외측길이  <math>h, b, d</math>: 모서리 제외 길이  <math>R, r</math>: 모서리의 반경                     </p> <p> <math>H \times B \times D = 180 \times 50 \times 20</math>  <math>h \times b \times d = 172.8 \times 42.8 \times 16.4</math>  <math>R = 3.6, r = 2.4</math> </p>	1.2	500 (640)

$\ast$  SSC275 강재는 연신율에 따른 제한조건 검토 불필요.

표 B.2 KDS 41 30 30, 표 1.6-1 부재설계에 대한 적용 한계 검토

조건	제한변수	유효폭범	직접강도범	예제	
압축을 받는 구속판요소	$h/t$	$\leq 500$	$\leq 500$	144	O.K
압축을 받는 단부 구속판요소	$b/t$	$I_s \geq I_a, \leq 90$ $I_s < I_a, \leq 60$	$\leq 160$	35.67	O.K
압축을 받는 비구속판요소	$d/t$	$\leq 60$	$\leq 60$	13.67	O.K
안쪽 구부림 방지름	$r/t$	$\leq 10$	$\leq 20$	2	O.K
단순 끝단스티프너 길이/폭 비	$D/B$	$\leq 0.7$	$\leq 0.7$	0.4	O.K
끝단스티프너 유형		단순	단순 및 복합	단순	O.K
공칭항복강도	$F_y$	$< 590$ MPa	$< 655$ MPa	264 MPa	O.K

### 3.4 냉간성형에 의한 항복강도 및 강도 증가

#### 3.4.2 냉간성형에 의한 강도 증가

$$F_{uw} = 352.2, F_{yv} = 264.4, \therefore F_{uw}/F_{yv} = 1.33 \geq 1.2 \text{ O.K}$$

$$B_c = 3.69 \times (352.2/264.4) - 0.819 \times (352.2/264.4)^2 - 1.79 = 1.672$$

$$m = 0.192 \times (352.2/264.4) - 0.068 = 0.1878$$

$$F_{yc} = 1.672 \times 264.4 / 0.4^{0.1878} = 525.1$$

$$C = \pi(3.6^2 - 2.4^2) / \{ (172.8 + 42.8 \times 2 + 16.4 \times 2) \times 1.2 + \pi(3.6^2 - 2.4^2) \} = 0.06080$$

$$\therefore F_{ya} = 0.06080 \times 525.1 + (1 - 0.06080) \times 264.4 = 280.3 \text{ O.K} \leq 352.2$$

※ 이번 산정 과정에서는 반영하지 않음

### 4.3 압축부재

#### 4.3.2 항복 및 전체 좌굴(휨좌굴, 비틀림좌굴 및 휨비틀림좌굴)

##### 4.3.2.1 비틀림 또는 휨비틀림 좌굴에 지배받지 않는 단면

$$F_{cre} = \frac{\pi^2 \times 209,256}{(1 \times 640/18.69)^2} = 1,761 \text{ MPa}$$

##### 4.3.2.2 비틀림 또는 휨비틀림 좌굴에 지배받는 2축 또는 1축 대칭부재

$$r_o = \sqrt{68.68^2 + 18.69^2 + 35.32^2} = 79.46$$

$$\beta = 1 - (-35.32/79.46)^2 = 0.8024$$

$$\sigma_t = \frac{1}{372.1 \times 79.46^2} \times \left[ 80,483 \times 175.3 + \frac{\pi^2 \times 209,256 \times 9.17 \times 10^8}{(1 \times 640)^2} \right] = 1,974 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 \times 209,256}{(1 \times 640/68.68)^2} = 23,785 \text{ MPa}$$

$$F_{cre} = \frac{1}{2 \times 0.8024} \times \left[ (23,785 + 1,974) - \sqrt{(23,785 + 1,974)^2 - 4 \times 0.8024 \times 23,785 \times 1,974} \right]$$

$$= 1,940 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow F_{cre} (\text{MIN}) = 1,761 \text{ MPa}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{264.4}{1,761}} = 0.3875 \leq 1.5$$

$$\Rightarrow F_n = F_{cr} = (0.658^{0.3875^2}) \times 264.4 = 248.3 \text{ MPa}$$

$$\therefore P_{ne} = 248.3 \times 372.1 = 92.39 \text{ kN}$$

#### 4.3.3 항복 및 전체좌굴과 상호작용하는 국부좌굴

##### 4.3.3.1 유효폭법

##### 4.12 판요소의 유효폭

##### 4.12.1 균일압축을 받는 구속판요소의 유효폭

$$F_{cr1} = 4 \times \frac{\pi^2 \times 209,256}{12 \times (1 - 0.3^2)} \times \left( \frac{1.2}{172.8} \right)^2 = 36.48 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{248.3}{36.48}} = 2.609 > 0.673$$

$$\Rightarrow \rho = (1 - 0.22/2.609)/2.609 = 0.3510$$

$$\therefore b = 0.3510 \times 172.8 = 60.65 \text{ mm}$$

##### 4.12.2 비구속판의 유효폭

##### 4.12.2.1 균일압축을 받는 비구속판요소

$$F_{cr1} = 0.43 \times \frac{\pi^2 \times 209,256}{12 \times (1 - 0.3^2)} \times \left( \frac{1.2}{16.4} \right)^2 = 435.4 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{248.3}{435.4}} = 0.7551 > 0.673$$

$$\Rightarrow \rho = (1 - 0.22/0.7551)/0.7551 = 0.9384$$

$$\therefore b = 0.9384 \times 16.4 = 15.39 \text{ mm}$$

##### 4.12.3 균일압축을 받는 단순끝단스티프너가 있는 판요소의 유효폭

$$S = 1.28 \times \sqrt{209,256/248.3} = 37.16, \text{ *}f \text{ 탄성좌굴응력 사용}$$

$$I_a = 399 \times 1.2^4 \times \left( \frac{42.8/1.2}{37.16} \right)^3 = 208.7 \text{ O.K} \leq 1.2^4 \times \left( 115 \times \frac{42.8/1.2}{37.16} + 5 \right) = 318.9$$

$$I_S = (16.4^3 \times 1.2 \times \sin^2 90^\circ) / 12 = 441.1$$

$$R_f = 441.1/318.9 = 1.383 \leq 1 \Rightarrow 1$$

표 4.12-1 판 좌굴계수의 산정

$$D/w = 20/42.8 = 0.4673 < 0.8$$

$$n = \left( 0.582 - \frac{42.8/1.2}{4 \times 37.16} \right) = 0.3420 \geq 1/3 \Rightarrow 0.3420$$

$$\Rightarrow \left( 4.82 - \frac{5 \times 20}{42.8} \right) \times (1)^{0.3420} + 0.43 = 2.914 \text{ O.K} \leq 4$$

$$F_{cr1} = 2.914 \times \frac{\pi^2 \times 209,256}{12 \times (1 - 0.3^2)} \times \left( \frac{1.2}{42.8} \right)^2 = 433.2 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{248.3}{433.2}} = 0.7571 > 0.673$$

$$\Rightarrow \rho = (1 - 0.22/0.7571)/0.7571 = 0.9370$$

$$\therefore b = 0.9370 \times 42.8 = 40.10 \text{ mm}$$

$$w/t = 42.8/1.2 = 35.67 > 0.328 \times 37.16 = 12.19$$

$$\therefore b_1 = 40.10/2 \times 1^{0.3420} = 20.05 \text{ mm}$$

$$b_2 = 40.10 - 20.05 = 20.05 \text{ mm}$$

$$d_s = 15.39 \times 1 = 15.39 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow A_e = \{60.65 + (20.05 + 20.05) \times 2 + 15.39 \times 2\} \times 1.2 + \pi(3.6^2 - 2.4^2) = 228.6 \text{ mm}^2$$

$$\therefore P_{nl} = 248.3 \times 228.6 = 56.76 \text{ kN O.K} \leq 92.38 \text{ kN}$$

#### 4.3.3.2 직접강도법

##### 4.13 부재의 탄성좌굴 해석

##### 4.13.3 해석적 해

##### 4.13.3.1 압축을 받는 부재

##### 4.12.1 균일압축을 받는 구속판요소의 유효폭

$$F_{cr1} = 4 \times \frac{\pi^2 \times 209,256}{12 \times (1 - 0.3^2)} \times \left( \frac{1.2}{172.8} \right)^2 = 36.48 \text{ MPa}$$

##### 4.12.2.1 균일압축을 받는 비구속판요소



$$F_{crl} = 0.43 \times \frac{\pi^2 \times 209,256}{12 \times (1 - 0.3^2)} \times \left( \frac{1.2}{16.4} \right)^2 = 435.4 \text{ MPa}$$

4.12.3 균일압축을 받는 단순끝단스티프너가 있는 판요소의 유효폭

$$S = 1.28 \times \sqrt{209,256/248.3} = 37.16, *f \text{ 탄성좌굴응력 사용}$$

$$I_a = 399 \times 1.2^4 \times \left( \frac{42.8/1.2}{37.16} \right)^3 = 208.7 \text{ O.K} \leq 1.2^4 \times \left( 115 \times \frac{42.8/1.2}{37.16} + 5 \right) = 318.9$$

$$I_S = (16.4^3 \times 1.2 \times \sin^2 90^\circ) / 12 = 441.1$$

$$R_f = 441.1/318.9 = 1.383 \leq 1 \Rightarrow 1$$

표 4.12-1 판 좌굴계수의 산정

$$D/w = 20/42.8 = 0.4673 < 0.8$$

$$n = \left( 0.582 - \frac{42.8/1.2}{4 \times 37.16} \right) = 0.3420 \geq 1/3 \Rightarrow 0.3420$$

$$\Rightarrow \left( 4.82 - \frac{5 \times 20}{42.8} \right) \times (1)^{0.3420} + 0.43 = 2.914 \text{ O.K} \leq 4$$

$$F_{crl} = 2.914 \times \frac{\pi^2 \times 209,256}{12 \times (1 - 0.3^2)} \times \left( \frac{1.2}{42.8} \right)^2 = 433.2 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow F_{crl}(MIN) = 36.48 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow P_{crl} = 372.1 \times 36.48 = 13.57 \text{ kN}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{92.38}{13.57}} = 2.609 > 0.776$$

$$\therefore P_{nl} = \left[ 1 - 0.15 \times \left( \frac{13.57}{92.38} \right)^{0.4} \right] \times \left( \frac{13.57}{92.38} \right)^{0.4} \times 92.38 = 39.91 \text{ kN}$$

#### 4.3.4 단면형상변형좌굴

##### 4.3.4.1 구멍이 없는 부재

##### 4.13 부재의 탄성좌굴 해석

##### 4.13.3 해석적 해

##### 4.13.3.1 압축을 받는 부재

$$L_{crd} = \left\{ 6 \times \pi^4 \times 180 \times (1 - 0.3^2) \times \left[ 2,305 \times (17.46 + 31.34)^2 + 0 \right] - \frac{3,943^2}{21,539} \times (17.46 + 31.34)^2 \right\}^{1/4}$$

$$= 676.0 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow L(MIN) = 640 \text{ mm}$$

$$k_{\phi fe} = \left( \frac{\pi}{640} \right)^4 \times \left[ 209,256 \times 2,305 \times (17.46 + 31.34)^2 + 209,256 \times 0 \right]$$

$$- 209,256 \times \frac{3,943^2}{21,539} \times (17.46 + 31.34)^2$$

$$+ \left( \frac{\pi}{640} \right)^2 \times 80,483 \times 39.28$$

$$= 534.1$$

$$k_{\phi we} = \frac{209,256 \times 1.2^3}{6 \times 180 \times (1 - 0.3^2)} = 367.9$$

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left( \frac{\pi}{640} \right)^2 \times \left\{ 81.84 \times \left[ (17.46 + 31.34)^2 \times \left( \frac{3,943}{21,539} \right)^2 \right] - 2 \times (-2.759) \times (17.46 + 31.34) \times \left( \frac{3,943}{21,539} \right) \right. \left. + 31.34^2 + 2.759^2 \right\} + 2,305 + 21,538$$

$$= 2.781$$

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \left( \frac{\pi}{640} \right)^2 \times \frac{1.2 \times 180^3}{60} = 2.811$$

$$\Rightarrow F_{crd} = \frac{534.1 + 367.9}{2.781 \times 2.811} = 161.3 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow P_{crd} = 372.1 \times 161.3 = 60.02 \text{ kN}$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{98.37}{60.02}} = 1.280 > 0.561$$

$$\therefore P_{nd} = \left[ 1 - 0.25 \times \left( \frac{60.02}{98.37} \right)^{0.6} \right] \times \left( \frac{60.02}{98.37} \right)^{0.6} \times 98.37 = 59.54 \text{ kN}$$

따라서 예제의 공칭축강도는 다음과 같다.

$$\therefore P_{n,EWM}(MIN) = 56.76 \text{ kN}$$

$$\therefore P_{n,DSM}(MIN) = 39.91 \text{ kN}$$

## C 예제 결과 비교

표 C.1 예제 결과 비교

$P_{TEST}$ (kN)	$P_{ASD}$ (kN)	$P_{EWM}$ (kN)	$P_{DSM}$ (kN)	$\frac{P_{TEST}}{P_{ASD}}$	$\frac{P_{TEST}}{P_{EWM}}$	$\frac{P_{TEST}}{P_{DSM}}$
51.5	57.4	56.8	39.9	0.90	0.91	1.19
49.0				0.85	0.86	1.23
평균:				0.88	0.88	1.26
편차:				0.03	0.03	0.04

$P_{TEST}$ 는 중심압축실험 결과

$P_{ASD}$ 는 냉간성형강 구조설계기준(ASD)에 의해 도출된 공칭축강도

## D 횡변형 시작점 비교

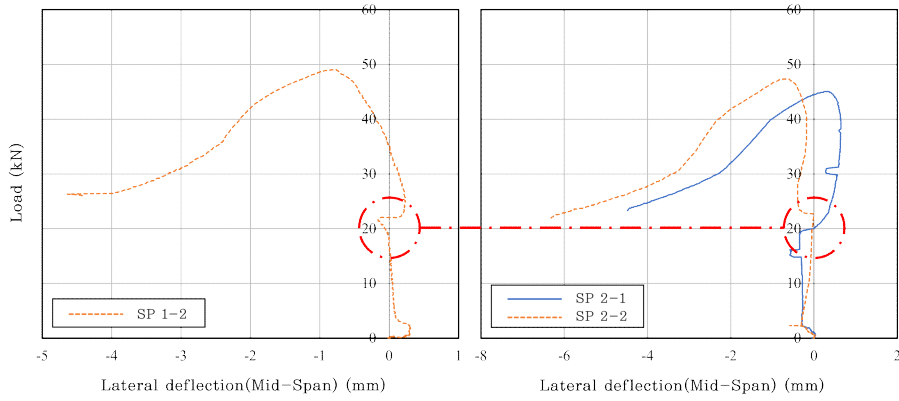


그림 D.1 횡변형 시작점 비교(SSC275-Lipped-C-1.2 mm)

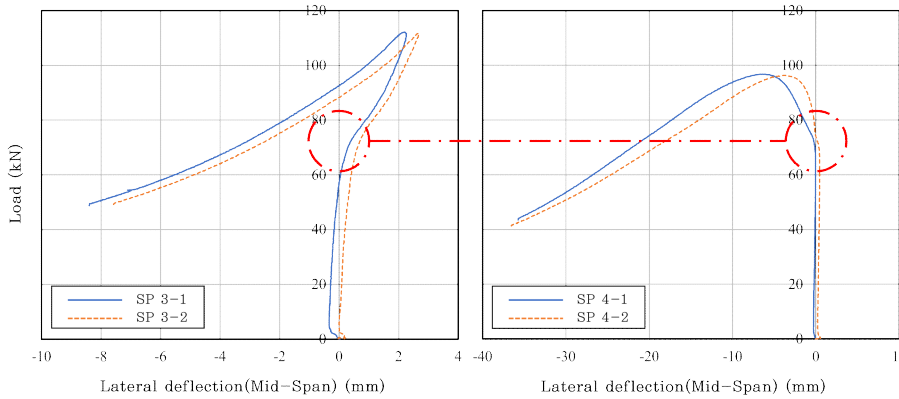


그림 D.2 횡변형 시작점 비교(SSC275-Lipped-C-1.8 mm)

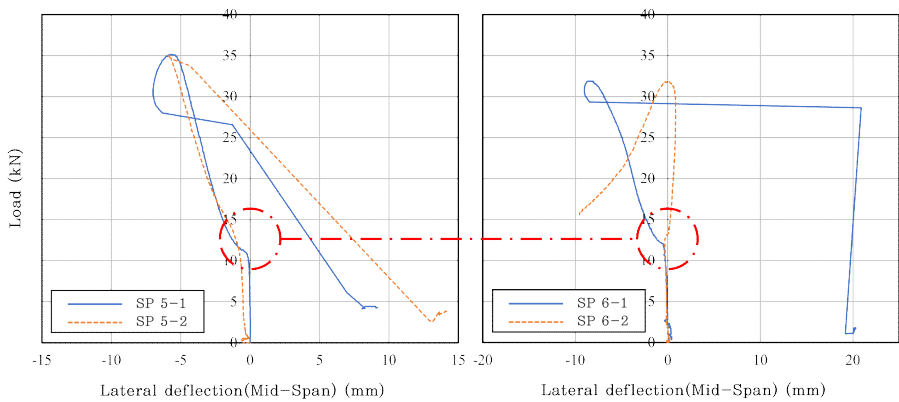


그림 D.3 횡변형 시작점 비교(SSC275-C-1.2 mm)

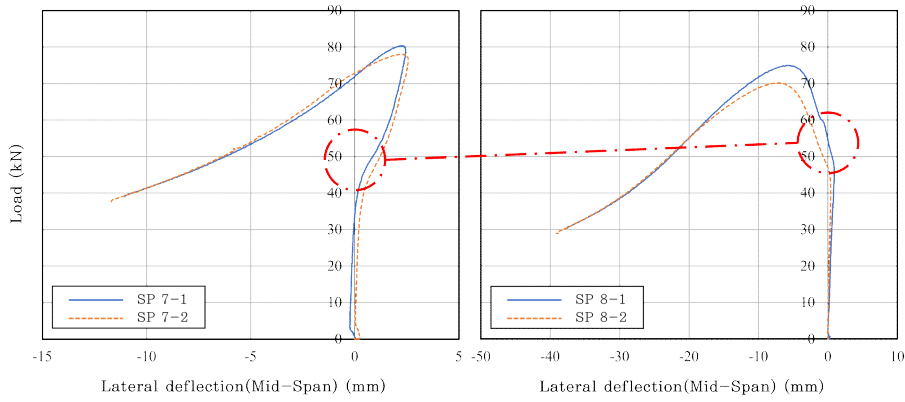


그림 D.4 횡변형 시작점 비교(SSC275-C-1.8 mm)

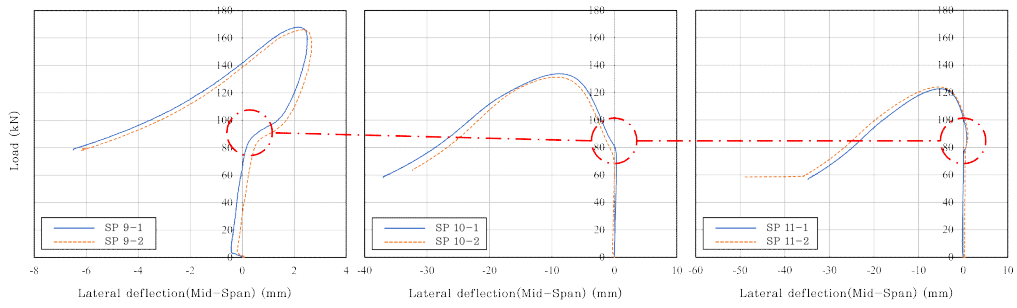


그림 D.5 횡변형 시작점 비교(SPFH590-Lipped-C-1.8 mm)

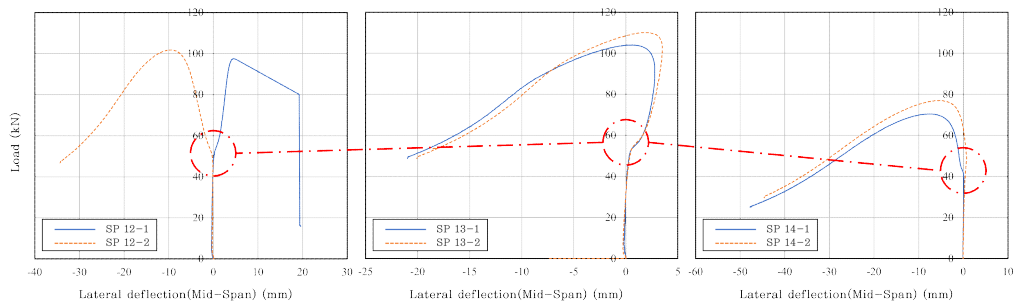


그림 D.6 횡변형 시작점 비교(SPFH590-C-1.8 mm)

## Abstract

Since the cold forming steel compression member formed by processing a thin plate is mixed with local buckling or distortion buckling along with the entire buckling, a close stability review is required.

In this paper, we tried to confirm whether the domestic thin-plate cold-formed steel material is suitable for the recently revised cold-molded steel design standards and whether the performance is satisfied as a compression member. General steel with a nominal yield strength of 275 MPa and high-strength steel with a yield strength of 420 MPa were selected to produce compression materials through cold-forming, and a central compression test was performed to confirm buckling behavior according to column slenderness ratio and cross-sectional shape. In addition, in order to numerically evaluate the buckling strength according to various column detail equipment that was not implemented in the experimental setup, a finite element analysis model was constructed to derive the buckling strength. In addition, for the analysis of the members, a modified analysis model that shortened the analysis time was constructed and the suitability was confirmed by comparing it with the previous analysis results, and through this, the buckling strength of members with an additional effective buckling length was derived. Through the experimental and FEA results, the applications presented in the design criteria for KDS 41 30 30 were reviewed. The strength calculated by the effective width method(EWM) and the direct strength method(DSM) showed somewhat more conservative results than the central compression experimental strength, but it was found to be relatively well matched when compared with the strength of various column detail equipment calculated based on the FEA. The nominal compressive strength calculated by the steel structural design code(KDS 14 31 10), which is the design standard for hot-rolled steel, showed a very large deviation compared to the central compression test and FEA results, indicating that the prediction of the buckling strength of cold-formed steel was inaccurate.

Based on experimental and analytical results, the suitability of applying the compression material provisions of the recently revised design standards for c

old-formed steel(KDS 41 30 30) was confirmed, and it was concluded that it was inappropriate to apply the design standards for hot forming steel.