

# 스틸스터드의 압축내력 평가

## An Evaluation of Axial Compressive Strength in Steel Stud

신 태 송<sup>1)</sup>

*Shin, Taesong*

**요 약 :** 본 연구에서는 중심압축력을 받는 스틸스터드의 설계강도에 대하여 다루었으며 비교 평가하였다. 미국규준인 냉간성형 LRFD 설계규준 (AISI), 유럽의 냉간박벽부재설계규준 (EC3 part 1.3) 및 독일의 관련규정 (DAST-Richtlinie 016)의 유사성과 차이점을 소개하고 분석하며 체계적으로 평가하였다. 특히 유효폭과 전체 안정성문제 (휨좌굴과 비틀림좌굴)가 이 논문에서 내포되어 있다. 또한 예제를 통하여 두 규준인 AISI와 EC3에 의한 설계압축강도를 산정하고 비교 분석하였다.

**ABSTRACT :** In relation to concentrically loaded compression, this research is to describe, analyze, and evaluate the design strength in steel stud. The similarity and difference among load and resistance factor design specification for cold-formed steel structural members (AISI), cold-formed thin gauge members and sheeting (EC3 part 1.3), and German draft (DAST-Richtlinie 016) are introduced, discussed, and systematically evaluated. Especially, the effective width and global instability problems (flexural buckling and torsional flexural buckling) are here implied in this research. The design axial strength by dual standards (AISI and EC3) is calculated and compared using the example.

**핵심용어 :** 설계압축강도, 냉간성형, 박벽, 유효폭, 휨좌굴, 비틀림좌굴

**KEYWORDS :** design axial strength, cold-formed, thin-walled, effective width, flexural buckling, torsional flexural buckling

### 1. 서 론

건물을 경량화 하면서도 역학적 성능을 발휘하는 부재 또는 시스템의 개발로 경제적 설계를 유도하려는 노력들이 끊임없이 계속되고 있다. 이러한 일환으로 경량 박벽 강구조를 이용한 공법이 개발되어 사용되고 있다.

강구조설계규준과 별도로, 경량박벽구조재는 박

판 (thin walled sheetings)을 냉간성형(cold-formed)한 것으로 구조 역학적 성능에 대하여 선진국에서는 박판구조설계규준(design of cold-formed structural members)을 제정하여 적용하고 있으며(1-4), 국내에서도 1998년에 냉간성형 구조설계기준안 및 해설을 제정하였다. 그리고 국내에서도 이러한 구조물 건립의 요구가 증가하고 있는 실정이다.

1) 정회원, 동명정보대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

그래서 우선 각기 다른 선진국의 구조설계개념의 특성을 파악하고 각규준별 차이점을 비교 검토하여 설계과정을 정리하고 이를 바탕으로 압축하중을 받는 냉간박벽구조의 내력을 평가하고자 한다.

연구의 방법으로 첫째, 선진국 박벽구조설계규준 (미국<sup>(1)</sup>, 유럽<sup>(2)</sup>, 독일<sup>(3)</sup>)에 대하여 비교 분석하였다. 둘째, 예제를 통하여 압축하중시 최대내력을 미국과 유럽의 규준에 따라 산정하고 그 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 일반사항

### 2.1 폭두께비 제한

박벽구조 단면으로 유리한 lip 보강 C형 단면은 그림 1과 같이 전형적으로 나타낼 수 있다. 평판부에서의 폭두께비 ( $b_p/t$ )는 아래 표 1과 같이 1991년 미국의 American Iron and Steel Institute의 LRFD Cold-Formed Steel Design Manual (이하 AISI라 칭함)에서, 1992년 유럽의 Eurocode 3, Part 1.3: Cold Formed Thin Gauge Members and Sheeting (이하 EC3라 칭함)에서, 1992년 독일 DAST Richtlinie



그림 1. Lip 보강 C형 단면형상

표 1. 폭두께비(bp/t) 제한치

폭두께비	AISI	EC3
a/t	500	500
b/t	60 90( $I_s > I_a$ 이고 c/b < 0.8일때)	60
c/t	60	-
c/b	-	0.2 ~ 0.6

$I_s, I_a$ 의 설명은 3.3절을 참조

016의 Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen. Deutscher Ausschuss für Stahlbau DAST에서 (이하 DAST-Ri. 016라 칭함) 설계시 타당한 것으로 제한되었다. 이 값들은 현장경험과 실험적 입증을 거쳐 규정되었다.

### 2.2 단면가정

박벽단면의 실제 상세도에서는 모서리부분이 rounding되어 있으며 단면성질을 계산할 때 AISI에서는 rounding 정도를 실제대로 적용하는데 반하여 EC3의 규준에서는 조건( $r \leq 5t, r/b \leq 0.15$ )을 만족할 때 충분히 뾰족한 것으로 이상화하여 단면을 가정한다. 그림 2의 (a)와 (b)에서는 각 규준별 단면의 판폭( $b_p$ )을 나타내고 있다.

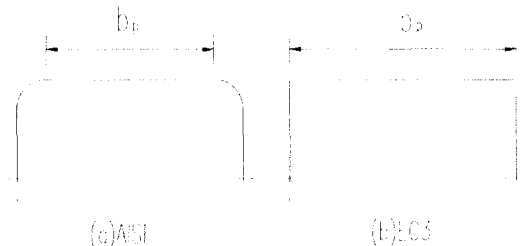


그림 2. 이상화된 단면의 판폭

## 3. 유효폭

### 3.1 유효폭 개념

예를 들어 4번지지 판에 압축응력이 작용할 때

양쪽이 지지된 판요소는 좌굴이 발생한 후에도 붕괴하지 않고 소성후좌굴능력을 보유하고 있어 내력이 상승하게 된다. 이때 좌굴전에 균등분포하던 응력상태는 판의 단부에 집중하여 불균등하게 분포되어 응력집중현상이 나타난다 (그림 3).

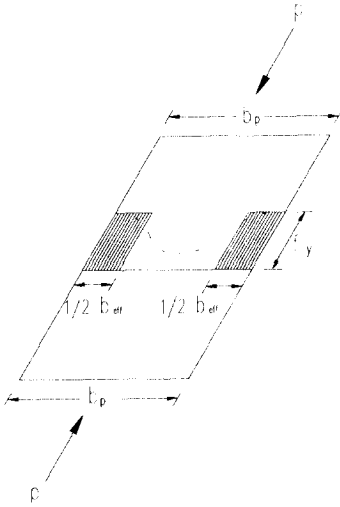


그림 3. 가상응력블록과 유효폭

실제의 응력분포를 단부에 응력이 집중하는 가상응력블록으로 치환하여 설계에 반영하고 있다. 이때 항복강도  $f_y$  가 단부에 균등분포한다고 가정하며 내력은 물론 변함없이 동일하다. 가상한 응력블록의 폭을 유효폭  $b_{eff}$  라 하며 kármán에 의하여 이론적으로 다음과 같은 식이 유도되었다 (3.5).

$$\frac{b_{eff}}{b_p} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_y}} \quad (3.1a)$$

$f_{cr}$  은 판의 좌굴응력도

$$f_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b_p/t)^2} \quad (3.2)$$

$k$ 는 판좌굴계수,  $\mu = 0.3$ ,  $E$ 는 탄성계수

초기변형과 같은 불완전성을 고려한 실험을 통

하여 Winter는 식(3.1a)보다 감소된 반실험식을 유도하였다.

$$\frac{b_{eff}}{b_p} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_y}} (1 - 0.22 \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_y}}) \quad (3.1b)$$

### 3.2 양단지지 판요소

등분포 압축력하에서 그림 1의 a부분요소와 같이 web나 flange로 양단이 지지된 경우

(a) AISI

유효폭  $b_{eff}$  는 다음과 같이 규정되어있다.

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p \quad (3.3)$$

$\rho$ 는 판좌굴 감소계수

$$\bar{\lambda}_p \leq 0.673 \text{ 일 때: } \rho = 1.0 \quad (3.4a)$$

$$\bar{\lambda}_p > 0.673 \text{ 일 때:}$$

식(3.1b)를 변형하여 감소계수식으로 표현한다.

$$\rho = (1 - 0.22 / \bar{\lambda}_p) / \bar{\lambda}_p \quad (3.4b)$$

$\bar{\lambda}_p$ 는 비교세장비

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr}}} = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f}{E}} \quad (3.5)$$

$f$ 는 압축응력도를 나타내며, 양단지지인 판에서  $k=4.0$  이다.

(b) EC3/DASt-Ri. 016

위 AISI규준과 동일하게 규정되어 있다. 단, 판폭  $b$ 에 대한 정의는 그림 2와 같이 서로 다르게 정의되어 있다.

### 3.3 일단지지 타단보강 판요소

등분포 압축력 작용시 그림 1에서 b부분 요소와 같이 일단은 web에 지지되어 있고 타단은 lip로 보강된 경우

(a) AISI

좌굴시 보강단부가 지지효과를 발휘하기 위하여는, 최소한의 필요강성 ( $I_a$ )을 지녀야 한다. 또한 보강단부 조건을 다음과 같이 세가지로 구분하여 최소필요강성 ( $I_a$ )을 규정하고 있다. 자세한 규정은 AISI B4.2에 따른다 (그림4 참조).

①  $b/t \leq \frac{S}{3}$  인 경우  $S = 1.28\sqrt{E/f}$

보강 단부를 가장 불리한 조건인 자유단으로 가정했을 때 ( $k=0.43$ ), 감소계수  $\rho$ 가 1.0이 되 기 위하여  $\bar{\lambda}_p = 0.673$  이하를 만족하는 조건은  $b/t = S/3$  이다. 즉, 이 경우에는 자유단으로 가정했기 때문에 최소필요강성을 필요로 하지 않으며 ( $I_a = 0$ ) 전체 판폭이 유효하게 된다.

$$b_{eff} = b, \quad c_{eff} = c$$

②  $\frac{S}{3} < b/t < S$ 인 경우

보강단부를 가장 유리한 조건인 지지단으로 가정했을 때 ( $k=4.0$ ),  $\rho$ 가 1.0이 되도록 하는 폭 두께비는  $S$  이다. 식(3.5)를 변형하여  $S$ 를 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{b_p}{t} &= \bar{\lambda}_p \frac{\sqrt{k}}{1.052} \sqrt{\frac{E}{f}} \\ &= 0.673 \frac{\sqrt{4}}{1.052} \sqrt{\frac{E}{f}} = 1.28\sqrt{\frac{E}{f}} = S \end{aligned}$$

이 경우는 최소필요강성 ( $I_a$ )을 규정하고 있으며 좌굴계수  $k$ 는 자유단 조건인 0.43 과 양단 지지조건인 4.0 사이의 값으로  $I_s/I_a$ 에 영향을 받는다.  $I_s$  는 판요소  $c$ 의 전체단면의 휨강성이다.

$$I_s = ct^3/12$$

lip부분  $c$ 의 유효폭을 구하기 위하여 감소계수는 양단지지 판요소의 식(3.4)와 동일하다. 이때  $k$ 값은 다음에서 구한 값으로 대치한다.

$$\begin{aligned} I_a/t^4 &= 399\{((b/t)/S) - 0.33\}^3 & (3.6) \\ n &= 1/2 \end{aligned}$$

$$b_{eff,2} = (0.5 b_{eff}) I_s/I_a \leq 1 \quad (3.7)$$

$$b_{eff,1} = b_{eff} - b_{eff,2} \quad (3.8)$$

$b_{eff}$  는 양단지지조건인 3.1절에 따라 구한다.

$0.25 < c/b \leq 0.8$  일 때,

$$\begin{aligned} k &= [4.82 - 5(c/b)](I_s/I_a)^n + 0.43 \\ &\leq 5.25 - 5(c/b) \end{aligned} \quad (3.9)$$

$c/b \leq 0.25$  일 때,

$$k = 3.57(I_s/I_a)^n + 0.43 \leq 4.0 \quad (3.10)$$

$$c_{eff} = c' (I_s/I_a) \leq c' \quad (3.11)$$

$c'$  는 단부  $c$ 의 초기유효폭

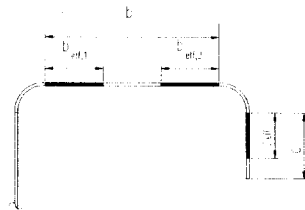


그림 4. 단부보강요소

③  $\frac{b}{t} \geq S$ 인 경우

양단지지조건이라고 가정했을 때  $\rho$ 가 1보다 작은 경우로서 최소필요강성 ( $I_a$ )는 판폭두께비가 크기 때문에 ②의 경우보다 더 증가되어 진다. 따라서 좌굴계수  $k$ 는 ②의 경우보다 더 적게되어  $\bar{\lambda}_p$ 가 증가된다. 결국 유효폭이 ②의 경우보다 더 감소하게 된다.

$$I_a/t^4 = [115(b/t)/S] + 5 \quad (3.12)$$

$b_{eff}$ ,  $b_{eff,2}$ ,  $b_{eff,1}$ ,  $k$ ,  $c_{eff}$  는 ②의 경우와 같이 구해진다. 이때  $n=1/3$  이다.

(b) EC3

AISI의 해석방법과는 완전히 다르게 EC3에서는 보강된 단부를 탄성지지조건으로 해석한다. 지지효과를 계산하기 위하여 탄성지지계수(spring stiffness)를 다음과 같이 그림 1의 C형상에서 구할 수 있다.

$$C_r = 1/\delta \quad (3.13)$$

즉, 압축이 작용되는 단부에 수직방향으로 가상

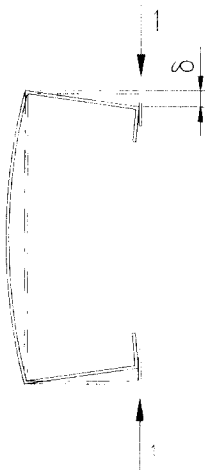


그림 5. 전단면 압축가력시 탄성지지계수 산정

단위하중 1을 가하여 가상일의 범칙으로부터 처짐  $\delta$ 를 구하여 역수인 탄성지지계수  $C_r$ 을 계산한다. 다음으로 위에서 구한 탄성지지계수를 고려하여 단면이 단부의 초기유효단면  $A_r$ 인 탄성지지보로 간주하여 해석할 수 있다.  $c_{eff}$ 를 구하기 위하여, AISI의 규정과 동일하게 양단지지인 경우의 감소계수  $\rho$ 의 식(3.3)을 적용한다. 이로부터 단부보강부의 좌굴임계응력을 구한다.

$$\sigma_{cr,r} = 2\sqrt{C_r \cdot E \cdot I_r / A_r} \quad (3.14)$$

$$A_r = (b_{eff,2} + c_{eff}) \cdot t \quad (3.15)$$

$I_r$ : 초기유효단면의 단면2차모멘트

단부의 초기유효단면적은 좌굴감소계수를 곱하여 감소되어진다.

$$A_{r,eff} = \chi \cdot A_r \quad (3.16)$$

$\chi$ 는 감소계수

$$\chi = \frac{1}{\Phi + (\Phi^2 - \bar{\lambda}_r^2)^{1/2}} \leq 1 \quad (3.17)$$

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda}_r - 0.2) + \bar{\lambda}_r^2] \quad (3.18)$$

$$\bar{\lambda}_r = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,r}} \quad (3.19)$$

$\alpha = 0.13$  (좌굴불완전계수 곡선  $a_0$ )

(c) DAST-Ri. 016

단부 초기유효단면적을 구하기 위하여 먼저 lip 부분의 유효폭  $c_{eff}$ 를 AISI와 EC3에서는 좌굴감소계수 식(3.4)를 적용하였다. (3.4)식은 양단지지조건인 경우에 해당하므로 lip의 경계조건과 차이가 있다. 즉 lip는 일단지지 타단자유인 조건이므로 (3.4)식을 적용하기에는 불리한 점이 있다.

이에 대한 고찰이 독일규준 DIN Part 3<sup>(8)</sup>과 독일시방서 DAST-Ri. 016<sup>(3)</sup>에서 다음과 같이 규정되어 있다.

$$\rho_r = 0.7 / \bar{\lambda}_r \quad (3.20)$$

$\rho_r$ 은 식(3.3)의  $\rho$ 보다 더 작은 값으로 안전성을 확보하고 있다<sup>(8)</sup>.

독일규준에서는 EC3와 유사하지만 단부 초기 유효단면적  $A_r$ 에 좌굴감소계수  $\chi$ 대신에 횡좌굴(lateral buckling)감소계수  $\chi_M$ 을 곱하여  $A_{r,eff}$ 를 구한다.

$$A_{r,eff} = \chi_M \cdot A_r \quad (3.21)$$

$$\chi_M = \frac{M}{M_{pl}} = \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{\bar{\lambda}_M^{2n}}} \right)^{1/n} \quad (3.22)$$

$$\bar{\lambda}_M = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,r}} \quad (3.23)$$

$M_{pl}$ 은 전소성모멘트이다.

여기서  $\chi_M$ 은 횡좌굴 감소계수  $\chi$ 보다 항상 높은 값을 나타내고 있다<sup>(7)</sup>.

EC3와 DAST-Ri. 016을 비교하면,  $c_{eff}$ 를 구하기 위하여, DAST-Ri. 016에서는 감소계수  $\rho_r$ 을 적용하여  $\rho$ 를 이용한 EC 3에 비하여 더 작은 초기유효단면적  $A_r$ 을 구하였다. 탄성지지 효과를 고려하여 초기유효단면적  $A_r$ 을 감소시키는 과정에서 이론적으로 좌굴 감소계수로 횡좌굴을 고려한  $\chi$ 을 적용하는 것이 논리적이나, EC 3에서는 횡좌굴감소계수  $\chi$ 를 사용하고 있다. 이를 보정하기 위하여 불완전계수  $\alpha$ 를 특별히  $\alpha_o = 0.13$ 으로 취하여  $\chi$  값을 상향 조정하려는 노력을 엿볼 수 있다.

표 2. 일단지지 타단자유인 판요소의 감소계수 비교

	EC3	Ri. 016	비교
판좌굴 감소계수	$\rho$	$\rho_r$	$\rho > \rho_r$
휨좌굴 감소계수	$\chi$	$\chi_M$	$\chi < \chi_M$

전체적으로는  $A_r$ 과  $A_{r,eff}$ 를 계산하는 과정에서 서로 높고 낮은 영향을 미치고 있어서 그 결과의 오차는 크지 않은 것으로 사료된다.

#### 4. 중심압축 부재

스터드에 중심 압축력이 작용할 때 3절에서 구한 유효폭에 대하여 좌굴강도를 4.1절과 4.2절을 고려하여 구할 수 있다.

##### 4.1 휨좌굴 (Flexural buckling)

(a) AISI

비틀림 좌굴(torsional flexural buckling)이 발생되지 않는 경우의 압축내력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi_n P_n = \Phi_n A_{eff} f_n \quad (4.1)$$

여기서  $P_n$ : 공칭압축내력

$\Phi_n = 0.85$ , 압축내력시 저항계수

$A_{eff}$ : 공칭좌굴응력도  $f_n$  작용시 유효 단면적,

$f_n$ 은 다음과 같이 구한다.

$f_{cr} > f_y/2$  일 때,

$$f_n = f_y (1 - f_y/4 f_{cr}) \quad (4.2a)$$

$f_{cr} \leq f_y/2$  일 때,

$$f_n = f_{cr} \quad (4.2b)$$

$f_{cr}$ 는 휨좌굴 임계응력

$$f_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(l/i)^2} \quad (4.3)$$

$l$ : 좌굴길이

$i$ : 감소되지 않은 전체단면의 단면2차반경

비탄성영역에서  $f_n$ 은 Engesser가 제안하고 Shanley가 입증한 tangent modulus 개념에 Structural Stability Research Council 에서 잔류응력효과를 추가하여 규정한 식이다. 이때 탄성비례한도는 항복강도의 1/2까지로 가정한다<sup>(6)</sup>. 즉 탄성비례한도내에서는  $f_{cr}$ 을 직접 사용하나 비탄성범위에서는 곡선식 (4.2a)을 사용한다.

(b) EC 3

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A_{eff} \cdot f_y / r_M \quad (4.4)$$

여기서  $\chi$ : 휨 좌굴 감소계수

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{1/2}} \leq 1 \quad (4.5)$$

$$\phi = 0.5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (4.6)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (4.7a)$$

또는

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} &= \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{A \cdot f_{cr}}} = \\ &= \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr}}} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} = \frac{l}{i \lambda_a} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \quad (4.7b) \end{aligned}$$

$A_{eff}$ : 항복압축응력  $f_y$  작용시 유효단면적

$N_{cr}$ : 전체단면에 대한 임계좌굴하중

$$r_M = 1.1$$

$$\lambda_a = \pi \sqrt{E / f_y} \quad (4.8)$$

$\alpha$ 는 단면형상별 잔류응력을 고려한 값이다. 여기서 일축대칭인 lip 보강 c형 단면을 사용하는 경우에 유럽좌굴곡선 b를 취하여  $\alpha = 0.34$ 가 된다. 단, 유효단면적 산정후 중립축이동이 발생했을 때는 편심에 의한 모멘트의 영향을 고려해야한다. 본 연구에서는 편심모멘트의 영향은 제외하였다.

(c) DAST-Ri. 016

EC3에서는 전체단면에 관한 단면2차반경  $i$ 이 있으나 독일규준에서는 유효단면의 값  $i'$ 를 사용한다. 또한 중립축의 이동에 의한 영향을 휨좌굴 감소계수 산정시 직접 반영한다 (그림 6 참조).

$$N_{b,Rd} = \chi' \cdot A_{eff} \cdot f_y / r_M \quad (4.9)$$

$$\chi' = \frac{1}{\phi' + [\phi'^2 - \bar{\lambda}'^2]^{1/2}} \leq 1 \quad (4.10)$$

$$\phi' = 0.5 \left[ 1 + \alpha'(\bar{\lambda}' - 0.2) + \bar{\lambda}'^2 + \frac{\Delta \omega_o r'_c}{i'^2} \right] \quad (4.11)$$

$$\alpha' = \alpha \frac{i' r'_c}{i r_c} \quad (4.12)$$

$$\bar{\lambda}' = \frac{l}{i' \lambda_a} \quad (4.13)$$

$$i' = \sqrt{I / A'} \quad (4.14)$$

$I, A'$  유효단면의 단면2차모멘트, 단면적

$\Delta \omega_o = e$  유효단면산정후 중립축이동

$r_c, r'_c$  전체단면, 유효단면의 중립축으로 압축연단까지의 거리

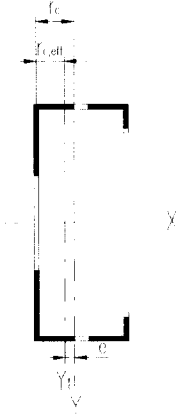


그림 6. 중립축 이동

AISI와 EC 3의 비교에서  $f_n$ 은 EC 3의  $\chi \cdot f_y$ 와 대응한다. 이때 EC 3에서는 잔류응력의 효과를 단면형상별로 세분(4가지 유럽좌굴곡선)하고 있는 장점이 있다<sup>(7)</sup>.

#### 4.2 비틀림좌굴 (torsional buckling)

폐쇄형 단면에서는 강한 비틀림 강성(torsional rigidity) 때문에 비틀림 좌굴이 발생하지 않는다. 그러나 점대칭, 일축대칭인 개방형, 박벽 단면형상에서는 비틀림 좌굴(torsional buckling) 또는 비틀림 휨좌굴(torsional flexural buckling)에 의해 파괴 될 수 있으므로 두 경우중 작은 값을 설계에 반영하여야 한다.

(a) AISI

$$f_{cr,FT} = \frac{1}{2\beta} \left[ (\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta \sigma_{ex} \sigma_t} \right] \quad (4.15)$$

$$\beta = 1 - (x_o / i_o)^2 \quad (4.16)$$

$$i_o = \sqrt{i_x^2 + i_y^2 + x_o^2} \quad (4.17)$$

$i_o$  : 전단중심에 관한 단면2차반경

$x_o$  : 무게중심에서 전단중심까지의 거리 (-)

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(k_x l_x / i_x)^2} \quad (4.18)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A i_o^2} \left[ G I_T + \frac{\pi^2 E I_w}{(k_t l_T)^2} \right] \quad (4.19)$$

$I_T$  : St. Venant torsional 계수

$I_w$  : warping torsional 계수

압축내력은 식 (4.1)로부터 구해진다. 이 때 좌굴임계응력은  $f_{cr}$  식(4.3)대신에  $f_{cr,FT}$  식 (4.15)을 대입한다.

(b) EC3

비틀림좌굴 임계하중

$$N_{cr,FT} = A \cdot f_{cr,FT} \quad (4.20)$$

즉, 비틀림좌굴 임계응력  $f_{cr,FT}$  은 AISI와 동일하게 규정되어 있다.

비틀림좌굴 내력  $N_b, R_d$ 은 휨좌굴 내력식 (4.4)을 이용하여 구한다. 여기서  $\bar{\lambda}$ 를 계산할 때  $N_{cr}$  대신  $N_{cr,FT}$  (4.20)를 대입하며 좌굴곡선  $b$ 를 사용한다 ( $\alpha=0.34$ ).

(c) DASt-Ri. 016

비틀림 좌굴내력을 구하기 위하여, 비교세장비식(4.13)대신에 다음 조건을 내력식(4.9)에 대입한다.

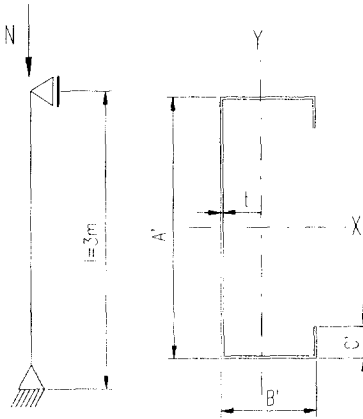
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,FT}}} \quad (4.21)$$

$f_{cr,FT}$ 는 전체단면이 아닌 유효단면에 대하여 식 (4.15)를 적용하여 구한다.  $\alpha$ 는 좌굴곡선  $c$ 를 사용한다. ( $\alpha=0.49$ )



## 5. 계산예

그림 6과 같이 압축하중을 받는 lip 보강 C형 단면인 스티드의 길이가 3m일 때 최대압축내력을 구하라. 단, 압축하중 N은 단면의 중심에 작용한다. 모서리의 내부곡률반경 R은  $2t=2\text{mm}$ 로 한다.



$$A'/B'/C'/t=100/40/11/1(\text{mm})$$

그림 7. 압축부재 시스템

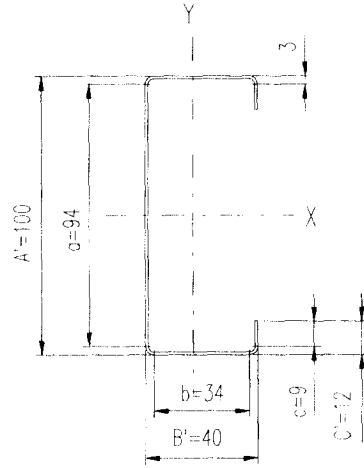


그림 8. AISI 규준에 의한 단면치수

$$r = R + t/2 = 2 + 1/2 = 2.5\text{mm}$$

$$a = A' - (2r + t) = 100 - (2 \cdot 2.5 + 1) = 94\text{mm}$$

$$b = B' - (2r + t) = 40 - (2 \cdot 2.5 + 1) = 34\text{mm}$$

$$c = C - (r + t/2) = 12 - (2.5 + 1/2) = 9\text{mm}$$

$$1/4\text{원의 원호 } u = 2\pi r/4 = 1.57r = 3.93\text{mm}$$

$$A = t[a + 2b + 2c + 4u] = 195.72\text{mm}^2$$

$$I_x = 305583 \text{ mm}^4$$

web 중심선에서 무게중심까지의 거리  $\bar{x}$

$$\bar{x} = 11.93\text{mm}$$

$$I_y = 43357\text{mm}^4$$

web 중심선에서 전단중심까지의 거리  $m$

$$m = 19.26\text{mm}$$

$$x_o = -(\bar{x} + m) = -(11.93 + 19.26)$$

$$= -31.19\text{mm}$$

$$I_T = (t^3/3)(a + 2b + 2c + 4u) = 65.24\text{mm}^4$$

$$I_w = 93 \cdot 129943.25\text{mm}^6$$

$$i_x = \sqrt{I_x/A} = \sqrt{305583/195.72} = 39.51\text{mm}$$

$$\lambda_x = l_x/i_x = 3000/39.51 = 75.93$$

$$i_y = \sqrt{I_y/A} = \sqrt{43357/195.72} = 14.88\text{mm}$$

### 5.0 기본사항

최대내력을 미국 AISI 와 유럽 EC 3 규준에 따라 각각 계산한다. 유효단면 산정으로 인한 중립축 이동시 그 영향을 무시하여 편심 모멘트는 고려하지 않는다. 즉 순수 중심축하중만 작용하는 것으로 간주한다. DAST-Ri. 016에서는 편심모멘트를 직접 고려했기 때문에 이 예제에서는 독일 규준에 따른 계산은 생략한다

#### 5.1 AISI 규준에 의한 최대내력

##### 5.1.1 단면형상 및 단면성질

전체단면에 대한 단면성질: 지면관계상 가능한 면 간단히 결과만 표시한다.

$$\lambda_y = l_y / i_y = 3000 / 14.88 = 200$$

$$i_o = \sqrt{i_x^2 + i_y^2 + x_o^2} = 52.49 \text{ mm}$$

$$\text{변수 } \beta = 1 - (x_o / i_o)^2 = 0.647$$

### 5.1.2 압축내력 $\Phi_n P_n$

$f_{cr}$ 은 4.1절 휨좌굴과 4.2절 비틀림좌굴에 의한 값중 작은값으로 하여  $f_n$ 을 산정한다.

4.1절에 따라 위 5.1.1항에서  $x$ 축보다  $y$ 축의 세장비가 더 크므로 불리한  $y$ 축에 대한 임계좌굴 응력은 다음과 같이 구해진다.

$$f_{cr,1} = f_{cr} = \pi^2 E / (l_y / i_y)^2 \\ = (\pi^2 * 2100) / (200)^2 = 0.518 \text{ t/cm}^2$$

4.2절에 따라

$$\sigma_{ex} = \pi^2 E / (l_x / i_x)^2 \\ = (\pi^2 * 2100) / (75.93)^2 = 3.59 \text{ t/cm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A i_o^2} \left[ G I_T + \frac{\pi^2 E I_w}{(k_t l_T)^2} \right] \\ = 0.50 \text{ t/cm}^2$$

$$f_{cr,2} = f_{cr,FT}$$

$$f_{cr,FT} = \frac{1}{2\beta} [(\sigma_{ex} + \sigma_t) \pm \\ \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta \sigma_{ex} \sigma_t}] \\ = 0.47 \text{ t/cm}^2$$

$$f_{cr} < f_y / 2 \text{ 이므로 } f_n = f_{cr} = 0.47 \text{ t/cm}^2$$

유효단면 결정

(전체단면이 등분포압축응력을 받을 때)

web부분 (그림 7의 a)

$$a = 94 \text{ mm}, f = f_n$$

$k = 4.0$  : 양단지지조건이므로

$$\bar{\lambda}_p = \frac{1.052}{\sqrt{4}} \frac{94}{1} \sqrt{\frac{0.47}{2100}} = 0.7397 > 0.673$$

$$\rho = (1 - 0.22 / \bar{\lambda}_p) / \bar{\lambda}_p = 0.95$$

$$a_{eff} = \rho a = 0.95 * 94 = 89.3 \text{ mm}$$

Flange 부분 (그림 7의 b)

$$S = 1.28 \sqrt{E/f}$$

$$= 1.28 \sqrt{2100/0.47} = 85.6$$

$$S/3 = 28.5 < b/t = 34 < S = 85.6 \text{ 인 경우}$$

$$I_a = 399 t^4 [ (b/t)/S - 0.33 ]^3$$

$$= 399 t^4 \{ 34/85.6 - 0.33 \}^3 = 0.12 \text{ mm}^4$$

$$I_s = c^3 t / 12 = 9^3 t / 12 = 60.75 \text{ mm}^4$$

$$I_s / I_a = 60.75 / 0.12 = 506 > 1$$

$$C'/b = 12/34 = 0.353$$

$$k = [4.82 - 5(C'/b)] (I_s / I_a) n + 0.43$$

$$\leq 5.25 - 5(C'/b)$$

$$= [4.82 - 5 * 0.353] (506) 1/2 + 0.43 = 69.1$$

$$5.25 - 5 * 0.353 = 3.485 < 69.1$$

$$k = 3.485$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{1.052}{\sqrt{3.485}} 34 \sqrt{\frac{0.47}{2100}} = 0.287 < 0.673$$

$$b_{eff} = \rho b = 1 * b = 34 \text{ mm} \text{ (} b \text{ 전체폭이 유효함)}$$

lip 부분 (그림 7의 c)

$$c = 9 \text{ mm}$$

$k = 0.43$  : 일단자유인 판요소

$$\bar{\lambda}_p = \frac{1.052}{\sqrt{0.43}} (9/1) \sqrt{\frac{0.47}{2100}} = 0.216 < 0.673$$

lip부분의 초기유효폭  $c'_{eff} = c = 9 \text{ mm}$

유효폭  $c_{eff} = c'_{eff} (I_s / I_a) \leq c'_{eff}$

( $c$ 전단면 유효)

전유효단면적:

$$A_{eff} = t(a_{eff} + 2b + 2c + 4 * u)$$

$$= 1(89.3 + 34 + 9 + 4 * 3.93)$$

$$= 191.02 \text{ mm}^2$$

최대압축내력:

$$\Phi_n P_n = \Phi_n A_{eff} f_n$$

$$= 0.85 * 191.02 * 0.47 = 0.763 \text{ t}$$

## 5.2 EC3 기준에 의한 최대내력

### 5.2.1 단면형상 및 단면성질

실제 단면을 이상화하기 위하여, 그림 7과 같이 각 판요소인 web, flange, lip의 중심선들로 단면의 치수를 정한다.

$$\begin{aligned} a &= 100 - t = 99 \text{ mm} \\ b &= 40 - t = 39 \text{ mm} \\ c &= 12 - t/2 = 11.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

전체단면에 대한 단면성질은 AISI에서 구한 값과 동일하므로 다시 구할 필요가 없으나, 유효폭 계산을 위하여는 상기의 이상화된 판폭  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 를 기본치수로 삼는다.

### 5.2.2 유효단면

전체단면에 등분포 압축항복응력  $f_y$ 가 작용할 때의 유효단면을 산정한다.

#### 5.2.2.1 web부분 (그림 7의 a)

양단지지조건으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} k &= 4.0 \\ a/t &= 99/1 = 99 \\ f &= f_y = 2.4 \text{ t/cm}^2 \\ \bar{\lambda}_p &= \frac{1.052}{\sqrt{4}} (99) \sqrt{\frac{2.4}{2100}} = 1.760 > 0.673 \end{aligned}$$

$$\rho = (1 - 0.22/1.760)/1.760 = 0.50$$

$$b_{eff} = 0.5 \cdot 99 = 49.5 \text{ mm}$$

#### 5.2.2.2 Flange 부분(그림 7의 b와 c)

일단은 web부분 (그림 7의 a)에 지지되어 있고 타단은 lip로 보강된 경우 먼저 양단지지조건으로 초기 유효폭을 산정한다.

$$\begin{aligned} b/t &= 39/1 = 39 \\ \bar{\lambda}_p &= \frac{1.052}{\sqrt{4}} (39) \sqrt{\frac{2.4}{2100}} = 0.693 > 0.673 \end{aligned}$$

$$\rho = (1 - 0.22/0.693)/0.693 = 0.985$$

$$b_{eff,1} = b_{eff,2} = 0.5 \cdot 0.985 \cdot 39 = 19.2 \text{ mm}$$

lip 부분의 초기유효폭은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c/t &= 11.5/39 = 0.3 \leq 0.35 \text{ 이므로} \\ k &= 0.5 \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{1.052}{\sqrt{0.5}} (11.5) \sqrt{\frac{2.4}{2100}} = 0.578 < 0.673$$

$\rho = 1$  이므로 lip 부분 전체가 초기 유효폭이 된다. 단부보강단면은  $b_{eff,2}$ 와  $c$ 부분으로 구성되며 보강단면의 단면적  $A_r$ 과  $I_r$ 은 다음과 같다.

$$A_r = t(b_{eff,2} + c) = 1(19.2 + 11.5) = 30.7 \text{ mm}^2$$

판요소  $b$ 로부터 보강단면의 중심까지 떨어진 길이  $x_r$ 은 다음과 같이 구한다.

$$x_r = c(c/2)/A_r = 11.5 \cdot 2 / 30.7 = 2.15 \text{ mm}$$

$$I_r = 1758 \text{ mm}^4$$

보강단부의 탄성지지계수  $C_r$ 를 구하기 위하여 그림 9과 같이 압축을 받는 경우 보강단부에 단위중 1을 가한다. 그 때 구한 처짐  $\delta$ 의 역수인 탄성지지계수를 계산한다. (그림 5 참조)

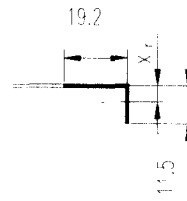


그림 9. 보강단부의 초기유효단면

$$\begin{aligned} C_r &= \frac{1}{\delta} = \frac{E t^3}{12[1 - \mu^2(-\frac{b^3}{3} + \frac{a b^2}{2})]} \\ &= 0.0093 \text{ t/cm}^2 \end{aligned}$$

단부보강 초기유효단면을 갖는 탄성지지보의

좌굴임계응력을 구한다.

$$\begin{aligned}\sigma_{cr,r} &= 2\sqrt{C_r \cdot E \cdot I_r / A_r} \\ &= 2\sqrt{0.0093 \cdot 2100 \cdot 0.1758 / 0.307} \\ &= 12.07 \text{ t/cm}^2 \\ \bar{\lambda}_r &= \sqrt{f_y / \sigma_{cr,r}} = \sqrt{2.4 / 12.07} = 0.446 \\ \Phi &= 0.5[1 + 0.13(0.446 - 0.2) + 0.446^2] \\ &= 0.615 \\ \chi &= 1 / [(0.615 + (0.615^2 - 0.446^2)^{1/2})] = 1.6 > 1\end{aligned}$$

그러므로  $\chi$  는 작은 값 1이 된다.

$$A_{r,eff} = \chi \cdot A_r = A_r = 30.7 \text{ mm}^2$$

전체 유효단면적:

$$\begin{aligned}A_r &= t a_{eff} + 2t(b_{eff,1} + A_{r,eff}) \\ &= 49.5 + 2(19.2 + 30.7) = 149.3 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

### 5.2.3 압축내력 $N_{b,Rd}$

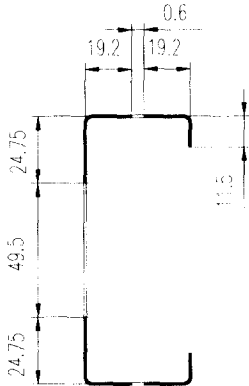


그림 10. 유효단면

#### 5.2.3.1 휨좌굴

압축하중을 받는 부재의 좌굴을 고려하기 위하여  $x$ ,  $y$ 방향의 세장비를 고려하면, 5.1.2항에서와 같이  $y$ 축의 세장비  $\lambda_y$ 가 200으로 더 크므로 설계시 고려해야할 축이다.

$$f_{cr} = \pi^2 E / \lambda^2 = \pi^2 2100 / 200^2 = 0.518 \text{ t/cm}^2$$

$$N_{cr} = A f_{cr}$$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda} &= \sqrt{A_{eff} f_y / N_{cr}} \\ &= \sqrt{1.493 \cdot 2.4 / (1.957 \cdot 0.518)} = 1.880 \\ \Phi &= 0.5[1 + 0.34(1.88 - 0.2) + 1.88^2] \\ &= 2.55 \\ \chi &= 1 / [2.55 + (2.55^2 - 1.88^2)^{1/2}] \\ &= 0.234 < 1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}N_{b,Rd,1} &= \chi \cdot A_{eff} \cdot f_y / \gamma_M \\ &= 0.234 \cdot 1.493 \cdot 2.4 / 1.1 = 0.763 t\end{aligned}$$

#### 5.2.3.2 비틀림좌굴

비틀림좌굴 임계응력  $f_{cr,FT}$  은 5.1.3에서 이미 계산되어졌으며 이를 이용하여 임계하중  $N_{cr,FT}$  를 구한다.

$$N_{cr,FT} = A f_{cr,FT} = 1.957 \cdot 0.47 = 0.92 \text{ t/cm}^2$$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda} &= \sqrt{A_{eff} f_y / N_{cr}} \\ &= \sqrt{1.493 \cdot 2.4 / (0.92)} = 1.97 \\ \Phi &= 0.5[1 + 0.34(1.97 - 0.2) + 1.97^2] = 2.74 \\ \chi &= 1 / [2.74 + (2.74^2 - 1.97^2)^{1/2}] = \\ &= 0.215 < 1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}N_{b,Rd,2} &= \chi \cdot A_{eff} \cdot f_y / \gamma_M \\ &= 0.215 \cdot 1.493 \cdot 2.4 / 1.1 = 0.700 t\end{aligned}$$

$N_{b,Rd,1}$ 과  $N_{b,Rd,2}$ 중 작은 값인 0.7t이 최대 내력  $N_{b,Rd}$ 이다.

### 5.3 결과 비교

표 3. 계산결과 비교

	저항 계수	유효단면적 $\text{cm}^2$	응력도 $\text{t/cm}^2$	압축내력 $t$
AISI	0.85	1.91	$f_n = 0.47$	0.763
EC 3	$1/1.1 = 0.91$	1.49	$\chi f_y = 0.215 \cdot 2.4 = 0.516$	0.700

1) 유효단면적:

- 판폭  $b$ 에 대한 정의가 서로 다르다
- 일단지지, 타단보강인 경우 해석의 차이
- 최대압축응력의 차이: AISI에서는  $f_n$ 가 적용되나, EC 3에서는  $f_y$ 로 한다.

2) 응력도:

- AISI( $f_n$ )/EC3( $\chi f_y$ ) : 휨좌굴감소계수의 영향이 서로 다르다.

3) 압축내력:

- AISI가 EC3보다 약간 상회하며, 결과는 8% 오차로 일반적으로 두기준이 서로 근사한 것으로 받아들여질 수 있다 (10%이내).

### 6. 결 론

이 연구에서는 스틸스터드의 압축내력을 평가하였다. 1-4장에서는 현행 국제규준들<sup>(1,2,3)</sup>에 대하여 이론적 배경, 설계공식 및 개념 등을 비교 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 5장에서는 실제예를 통하여 최대압축내력을 산정하고 결과를 비교 분석하였다. AISI가 EC3의 결과보다 약 8% 상회한다. 즉 EC3가 안전측에 놓여있다.

(2) 판요소의 국부좌굴 (local buckling)을 고려하기 위한 유효폭산정 개념이 AISI와 EC3규준에서 서로 다르다:

- 판폭  $b$  정의 (그림 2 참조)
- 판요소에 작용하는 최대압축응력:  $f_n$  (AISI에서),  $f_y$ (EC3/DAST-Ri.016에서)

(3) 구조시스템의 전체좌굴 (global buckling):

- 임계좌굴응력  $f_{cr}$ ,  $f_{cr,FT}$  은 동일하나,
- 휨좌굴감소계수의 영향이 다르다:  $f_n$ (AISI에서),  $\chi f_y$ (EC3/DAST-Ri.016에서)

### 감사의 말

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단 신진교수과제 지원으로 연구되었으며 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) American Iron and Steel Institute: LRFD Cold-Formed Steel Design Manual, 1991
- (2) Eurocode 3, Part 1.3: Cold Formed Thin Gauge Members and Sheeting. April 1992
- (3) DAST-Richtlinie 016: Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus duennwandigen kaltgeformten Bauteilen. Deutscher Ausschuss fuer Stahlbau DAST, Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, Koeln, 2. Auflage, Februar 1992
- (4) DIN 18807 Teil 1: Trapezprofile im Hochbau, Stahltrapezprofile: Allgemeine Anforderungen, Ermittlung der Tragfahigkeitswerte durch Berechnung. Juli 1987
- (5) 신대송: 박력 냉간성형 구조의 설계개념. 한국강구조학회지 제10권 1호. 1998년 3월
- (6) W.W.Yu: Cold-Formed Steel Design. John Wiley & Sons, Inc., 1991
- (7) DIN 18800 Teil 2: Stahlbauten: Stabilitatfalle: Knicken von Staben und Stabwerken. November 1990
- (8) DIN 18800 Teil 3: Stahlbauten: Stabilitatfalle: Beulen von Platten. November 1990

(접수일자 : 1998년 10월 30일)