후판 절곡 Z형 보의 내부 휨 반경에 따른 연성거동

Bending Behavior of Thick-Walled Press-Braked Z-Section Beams with Inside Bend Radii

최수영* · 최병호**

Su Young, Choi · Byung Ho, Choi

Abstract

Press-braked cross-section beams might be easily fabricated as economic plate structures due to the reduction of cutting and welding process. However, there is not sufficient a proper guide or relevant researches on press-braking fabrication of thick plates. Current fabrication guides and manuals speculate limitation of inside bend radii to thickness ratio (r/t) for cold-bending for relatively thin plates. Press-braked beams have to be verified as to a sufficient structural ductility. Thus, the main objective of this study is to provide a relative evaluation of effect of r/t on the moment-plastic rotation capacity of press-braked Z-shape beams which are fabricated by using SM490 24mm thick steel plates. Comparative studies are conducted for the press-braked beams with r/t values of 5 and 15. Through the finite element analyses, it is found that the press-braked beam model with r/t of 5 could attain the plastic moment strength suggested by the AASHTO LRFD and also show the rotational capacity exceeding 4, which means it has a sufficient structural ductility. More experimental studies are required for calibration of the analytical method for practical use.

Key words : Press-braking, Finite element analysis, Inside bend radii, Moment rotation-capacity

요 지

구조부재를 절곡해서 제작하면 후판 절단 및 용접 과정을 줄일 수 있어 경제적이다. 하지만 후판의 절곡 제작기준이나 검토 방안이 명확히 제시되어 있지 않은데다, 변형경화로 인해 연성이 저하되므로 8 mm 이내 판두께 범위에 대해 주로 적용되어 왔다. 국내의 제작기준에서는 냉간 휨가공 시의 절곡내경-판두께비(r/t)를 제한하고 있으며, 주로 충격인성에 대해 관련 규준들이 제시되고 있다. 절곡 제작된 부재가 휨부재로써 활용되기 위해서 충분한 휨연성을 확보하는지에 대한 검토가 필요하다. 이에, 본 연구에서는 판두께 24 mm의 SM490 후판을 절곡한 Z형 단면 보에 대해 r/t 에 따른 구조휨연성에 대한 영향을 해석적으로 비교하였다. r/t 가 15와 5로 절곡한 재료특성을 실험적으로 획득하고 이를 반영한 해석모형을 수립하여 비교연구를 수행하였다. 본 해석모형 절곡 보의 휨강도는 AASHTO LRFD 비탄성 설계기준강도에 도달하는 것으로 해석되었고 r/t 가 5인 보의 휨연성도는 약 15% 내외 저감되지만 최소 4 이상 확보하며 충분한 수준을 유지하는 것으로 분석되었다. 추후 본 해석적 연구방식의 실용적 활용을 위해서는 실험적 검증에 의한 검교정 과정이 요구된다.

핵심용어 : 절곡, 유한요소해석, 내부 휨 반경, 휨연성

1. 서 론

냉간성형강 단면은 냉간압연(Cold rolling), 절곡(Press-braking), 접기(Folding)등으로 제작된다. 제작단면이 소량이거나 길이가 6~12 m 이하일 경우에는 접기나 절곡 방식으로 제작되나, 대량이거나 긴 부재의 단면이 필요한 경우에는 냉간압연 방식으로 제작되어 오고 있다. 절곡부재는 냉간성형 제작방법 중에서 Fig. 1과 같이 절곡에 의해 제작된 부재를 말한다. 강재 생산기술의 발달로 강재 후판은 점차 광폭화되

고 있어, 교량 등에 쓰이는 대형 구조부재를 절곡하는 방식으로 제작하면 후판의 절단 및 용접 과정을 줄일 수 있어 보다 경제적이다. 하지만, 강재를 절곡하게 되면 과도한 굽힘 과정을 통해 재료는 소성변형을 겪게 되어 심할 경우 표면에 균열이 발생할 수도 있다.

이러한 재료의 경화로 인해 기계적 특성이 변화되는데, 인장강도는 증가하는 반면 연성 및 연신율이 저하되고 충격인성이 감소하는 특징이 있다. 강재에 절곡 등 제작과정에 의한 예비변형(Prestain)이 심할수록 변형시효에 의해 연신율이

*정회원. 한밭대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: md301052@hanbat.ac.kr)

Member. Master candidate, Department of Civil Engineering, Hanbat National University

**교신저자. 정회원 한밭대학교 건설환경공학과 교수(Tel : +82-42-821-1105, Fax : +82-42-821-1105, E-mail: bhchoi@hanbat.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

Fig. 1. Press-braking operation

상당히 저감될 수 있는 것으로 알려져 있다(Homma et al., 1997). 따라서 국내에서의 절곡 제작은 판두께 8 mm 이내 범위에 대해 주로 적용되어 왔다. 유럽 등 국외에서도 주로 판두께 16 mm 이내 범위에 대해 관련 상세 규정을 구체적으로 제시하고 있으며, 20 mm 이상 두께의 후판을 절곡하는 경우에는 제작사의 자체적인 사전 검증과정을 두도록 권고하고 있다.

국내에서는 도로교 표준시방서(2005)에 휨 가공에 대한 규정이 제시되어 있다. 절곡을 포함한 휨 가공의 경우 곡률반경으로 제한을 두고 있는데 기본적으로 휨 가공된 부재의 내측 곡률반경이 부재 두께의 15배 이상이어야 한다고 명시되어 있다. 단, 강재의 화학성분 중 질소가 0.006%를 넘지 않는 재료로서 KS B 0810에서 규정하는 샤르피 충격시험 결과가 150J 이상인 경우는 내측 곡률반경을 강재두께의 7배까지, 200J 이상 강재는 강판두께의 5배까지 줄여줄 수 있도록 제시되어 있다.

이 규정에 의거하면 판 두께 증가에 따라 절곡 휨 반경이 크게 증가하게 되어 구조물의 단면상세로는 효율이 극히 떨어지게 되거나, 강재의 충격인성이 크게 증가되어야 해서 실질적인 적용에 있어 매우 까다롭다. 따라서 후판 절곡을 활성화 하려면 성능 검토를 통해 강종이나 두께 별로 관련 제작기준이 보다 상세히 향상되어야 할 필요성과 함께, 최근 개발되고 있는 고성능 후판에 대해서도 면밀히 검토할 필요가 있다.

한편, 충격인성 외에 절곡부위의 연신을 저감으로 인한 구조연성에 대해 미치는 영향은 구체적으로 검토되지 못하고 있어, 이에 대한 적절한 평가방안이 정립되어야 한다. 절곡 단면 보의 절곡부에서 연신율이 다소 저하되더라도 충격인성과 함께 전체적인 휨부재의 구조연성이 충분하다면 절곡 상세를 개선 할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 이에 대한 다양한 연구 검토가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 절곡 보의 구조휨연성을 해석적으로 검토하는 합리적인 방안을 정립하고 현재 국내 관련 시방에서 제한하고 있는 내부 휨 반경-판두께비(r_i/t)가 15인 경우와 현재 조건부로 엄격한 제한을 갖고 허용되는 r_i/t 가 5인 단면의 보에 대해 해석모형을 수립하여 비교연구를 수행하였다. 본 논문에서는 판두께 24 mm의 일반 구조용 압연 강재인 SM490을 절곡한 Z형 단면 보의 구조휨연성을 해석적으로 평가한 결과를 제시하고자 한다.

해석적 방법으로는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 Z형 형태의 단면을 갖는 절곡 보를 대상으로 비선형비탄성 해석을 수행하였다. Quach et al.(2010)은 시험적으로 평가한 절곡 보의 재료특성을 절곡부와 평탄부로 구분하

(a) Inside bend radius to plate thickness ratio more than 15

(b) Inside bend radius to plate thickness ratio less than 5

Fig. 2. According to the inside bend radii details

여 적용해서 절곡 보의 거동을 합리적으로 예측하는 유한요소 해석 기법을 제시하였다. Guo et al.(2007)은 두께 8~12 mm 강판을 냉간성형으로 제작한 단면 기둥의 압축강도에 대해 실험적 연구를 수행하였다. 이 때, 인장시편 시험을 통해 얻은 직선부와 절곡부의 물성치를 이용해 평가한 기준강도는 실 규모의 실험결과와 비교해서 보수적인 평가 결과를 보였다. Gardner et al.(2010)은 냉간성형한 4각 단면의 빔 부재에 대해 직선부와 절곡부 시편의 인장시험, 스티브 기둥 시험과 굽힘 시험 결과로부터 유로코드3의 한계 세장비를 평가하였다.

본 논문의 해석모델은 미국 AASHTO LRFD(2007)에 따라 소성모멘트 단면 제원과 비지지 길이(L_b)를 선정되었다. 관련 문헌조사(Pi et al, 1999; Kim, 2001; Gardner et al, 2010; Guo et al, 2007; Quach et al, 2010)를 참조하여 절곡된 단면의 초기불완전성 및 직선부와 절곡부 위치별 인장시편시험에 의한 강재의 비탄성재료특성을 적용한 비선형 유한요소해석을 수행하였다.

본 유한요소해석 결과를 이용하여 해석모델들의 휨연성도와 휨강도를 상대적으로 비교분석하였고, Barth and White (1998) 및 Gardner et al.(2010)에 제시된 방법을 이용하여 절곡 보의 휨연성도를 평가하였다. 휨강도는 유한요소해석결과와 설계기준에 따른 휨강도를 비교하였다.

2. 해석모델

2.1 단면형상 및 제원

본 연구에서는 절곡을 통해 제작한 Z형 단면 보를 해석모델로 정하여 이들에 대한 휨거동 해석을 수행하였다. 해석모델들은 미국 AASHTO LRFD(2007)의 소성모멘트 단면으로 설계하여, SM490 강재를 적용한 U형 단면의 절반에 해당하는 모델을 선정하였다. 기본적인 재료물성치는 탄성계수 205,000 MPa, 포아송 비 0.3로 하였다. 해석모델의 단면은 Fig. 3과 같다. 단면제원은 Table 1과 같다. 유한요소해석을

Fig. 3. Analytical model beam cross-section

Table 1. Press-braked beam cross-sectional dimension

r_i/t_f	r_i (mm)	b_s (mm)	b_e (mm)	h (mm)	t_f (mm)
5	120	200	158	518	24

위해 ABAQUS에서 제공하는 S4R5 쉘요소를 이용하여, 총 10,080개의 요소로 구성하였다.

경계조건은 단순지지 조건을 적용하였고, AASHTO LRFD(2007)에 따라 횡방향 브레이싱이 일정한 간격으로 배치되었다. 하중은 보의 중앙에 집중하중을 재하 하여 해석하였다. 본 연구에서 적용한 Z형 보 모델은 균질한 보로 Z형 보의 세장비는 압축을 받는 웹의 깊이 비율(D_{cp}/D)은 50%, 웹/압축 플랜지 폭비(D/b_{fc})는 2.47로 하였다. 해석모델 보의 총 길이는 비지지 길이(L_b)의 12배로, 지지점 사이의 거리는 $12.0 L_b$ 로 모델의 길이를 구성하였으며, 해석 모델에 따라 비지지 길이는 500 mm로 계산하였다. 웹의 깊이 D 는 250 mm, 플랜지의 폭 b_s 는 200 mm로 산정하였다. 미국 도로교 설계기준에서의 조밀단면을 만족하기 위하여 복부세장비와 플랜지세장비를 조밀한계의 다양한 비율로 각각의 모델 산정시 고려하였다. 모든 해석모델 보는 3점 휨시험에 의해 극한강도까지 해석되었다.

3. 인장시험 평가

3.1 시험 계획 및 방법

절곡 영향에 따른 기계적 성질의 변화를 평가하고자 내부 휨 반경·관두께비를 각각 5와 15로 KS B 0804(금속 재료 굽힘 시험)에 따라 절곡하여 Fig. 4와 같이 시험체를 제작하였다. KS B 0801(금속재료 인장 시험편)과 KS B 0802(금속재료 인장시험 방법)을 적용하여 절곡 시험체의 단면 위치별(지점 A, B, C, D)로 단면 내 4개소에서 시험편을 채취

Fig. 4. Press-braked specimen and sampling position

Table 2. Press-braked specimen dimensions

Specimen	t (mm)	r_i (mm)	Press-braking angle (deg)	Width(mm)		Length (mm)
				Flat portion	Corner portion	
No.1	24	120	90	300.0	188.5	1000
No.2	24	120	45	300.0	94.2	1000
No.3	24	360	90	300.0	565.5	1000
No.4	24	360	45	300.0	282.7	1000

한 후에 인장강도 시험을 실시하였다. 본 인장시험을 통해 얻어진 응력-변형률 특성은 유한요소해석에서 해석모델의 재료특성으로 적용하고자 한다. 자세한 절곡시험체의 재원은 Table 2에 제시된 바와 같다. 절곡시험체의 관두께는 24 mm이며 절곡각을 45°와 90°로 하여 각각 제작하였다.

3.2 인장시험결과

강재 인장시험 결과로부터 도출된 응력-변형률 곡선을 Fig. 5~8과 같이 도식적으로 나타내었다. 본 연구의 SM490 시험편들의 공칭연신율은 KS기준인 21% 이상인 것으로 분석되었다. 대체로 직선부에 위치한 지점 A 시험편의 연신율이 곡선부 위치의 지점 C보다 높은 결과를 보였고, 내부 휨 반경·관두께비 감소에 따라 다소 줄어드는 현상을 보인다.

Fig. 5. No.1 specimen tensile test results

Fig. 6. No.2 specimen tensile test results

Fig. 7. No.3 specimen tensile test results

Fig. 8. No.4 specimen tensile test results

인장시험 결과로부터 분석된 항복강도, 인장강도, 연신율은 시험위치별로 분류하여 Table 3에 정리하였다. 각 지점의 평균값으로 비교한 결과, 절곡 지점과의 위치에 따라 다소 달라지지만 SM490 강재의 경우는 항복강도 343~367 MPa, 인장강도 517~531 MPa, 연신율 32~38%로 유사한 범위를 형성하고 있다. 다만 지점 C에서 항복강도 및 인장강도 모두 약간 높은 수준이며 연신율은 5~10% 정도 저하되는 경향을 보인다.

4. 유한요소 해석 및 결과분석

비선형 해석 시 재료경화에 의한 특성을 적용하기 위해, 절곡부와 직선부에 대한 각각의 응력-변형률 곡선모형으로부터 수치적 분석을 통해 탄성계수, 항복강도 및 소성변형률을 획득하였고, 포아송비는 공칭 기준값에 따라 0.3을 사용하였다.

극한 휨강도와 비탄성 영역의 연성 거동을 평가하기 위해 재료비탄성-기하비선형을 고려한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 직선부와 절곡부로 영역을 나누어 Table 3에 제시된 시험결과 재료특성을 활용하여 Table 4에서 제시된 조합으로 각각의 재료 비탄성 특성을 고려하였다.

초기기하학적 불완전특성은 탄성좌굴해석을 수행한 후 제 1 탄성좌굴모드를 보 제작 시방에서 제시된 허용변형오차에

Fig. 9. Finite element modeling of press-braked beam

Table 3. SM490 steel tensile strength test results

Test position	r_i/t	Material model	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
지점A	5	No.1	356	522	38
		No.2	345	517	36
	15	No.3	343	518	36
		No.4	355	524	38
지점C	5	No.1	366	531	33
		No.2	367	531	32
	15	No.3	347	522	32
		No.4	364	524	32

Table 4. Combination of material properties in nonlinear analysis

Case	S-S curve material model	
	Flat portion	Corner portion
R5-1	No.1-A	No.1-A
R5-2	No.1-A	No.1-C
R15-1	No.3-A	No.3-A
R15-2	No.3-A	No.3-C

의한 비율로 모형화하여 적용하였다. 비선형 수치해석을 위해 뉴턴-랩슨법과 수정 릭스법을 적용한 단계별 하중증분 해석을 실시하였다.

본 연구에서 휨부재의 휨연성 R_d 를 평가하기 위한 방법은 식 (1)과 같다. 즉, 휨연성 R_d 가 3 이상으로 평가되는 경우 통상적으로 충분한 휨연성 능력을 갖는 것으로 간주한다 (Barth and White, 1998).

$$R_d = \left(\frac{\theta_2}{\theta_1} \right) - 1 \geq 3 \quad (1)$$

여기서, θ_1 은 모멘트(M)가 처음 소성모멘트(M_p)에 도달하였을 때의 회전각을, θ_2 는 극한모멘트(M_u) 이후 모멘트가 감소하여 소성모멘트에 다시 도달할 때의 회전각을 의미한다.

재료특성별로 해석된 결과는 Table 5와 Fig. 10에 나타나어져 있다. 도식에 보이는 바와 같이 해석모델의 최대 휨강

Table 5. Bending strength results

Case	r_i/t	M_{FEM} (kN·m)	M_p (kN·m)	Diff. (%)
R5-1	5	1326.6	1124.4	17.9
R5-2	5	1369.0	1144.2	19.6
R15-1	15	1366.6	1104.4	23.7
R15-2	15	1339.8	1091.4	22.8

Fig. 10. Moment-displacement Diagrams

Fig. 11. Moment-Plastic Rotation Capacity

도(M_{FEM})는 설계휨강도인 소성모멘트(M_p)를 초과하여 충분한 강도성능을 갖는 것으로 평가되었다. 따라서, 본 해석모델 설계 시에 적용한 조밀단면 규준은 유효성을 갖는 것으로 판단

후판 절곡 Z형 보의 내부 휨 반경에 따른 연성거동

된다. Fig. 11은 해석결과로부터 휨모멘트와 단면 회전각과의 관계를 나타낸 $M-\theta$ 다이어그램이다. 절곡부 재료특성을 감안한 R5-2는 전 단면을 직선부 재료특성으로 단순하게 가정하

Fig. 12. Failure mode from nonlinear analysis

R5-1에 비해 5% 정도 저감된 휨연성 특성을 나타낸다. 따라서 절곡 보의 휨거동 특성을 합리적으로 분석하려면 절곡부 응력-변형을 곡선을 고려하는 것이 바람직하다. R5-1과 R15-1결과는 $r_f/t=5$ 인 경우와 15인 경우를 비교해 주고 있다. 이로부터 절곡에 의한 예비변형 정도에 따라 달라지는 재료의 특성으로 인해 휨연성이 대략 15% 수준이 저감되는 결과를 보여준다. R15-1과 R15-2는 거의 휨연성에 차이가 없는 것으로 나타났다. 즉, r_f/t 가 15인 보는 절곡 전 재료특성을 적용한 결과와 동일한 수준의 거동 양상을 보인다. 각 해석모델들의 휨연성 R_h 는 최저 10.0을 초과하는 수준으로 나타나 SM490 강재 두께 24 mm 후판을 적용한 본 해석모델 절곡 보의 휨연성 능력은 상대적으로 충분할 수 있을 것으로 사료된다. 특히 내부 휨 반경-판두께비가 5에 불과한 절곡상세에 대해서도 휨연성이 충분한 것으로 나타났으나, 추후 보다 다양한 실험을 시행하여 재료의 변형시효를 적극적으로 고려한 추가적인 검토가 요구된다. Fig. 12는 각 해석모델의 극한 휨거동 파괴모드를 나타낸다. 절곡 보 압축플랜지의 절곡부위를 중심으로 한 좌굴모드가 유사한 형태를 띠고 있다. 절곡된 플랜지에서 판좌굴 유효폭의 기준점이 상당히 모호한 면이 있어 향후 이를 규명하고 정립하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문은 절곡 제작된 부재가 휨부재로써 활용되기 위해 충분한 휨연성을 확보하는지에 대한 해석적 검토 방안을 정립하고 판두께 24 mm의 일반 구조용 압연 강재인 SM490을 절곡한 Z형 단면 보의 구조휨연성을 해석적으로 평가한 결과를 제시하고자 유한요소해석법을 이용하여 절곡 보를 모델링하여 검토하였다.

본 연구를 통해 r_f/t 가 15로써 절곡한 상세에 대해서는 절곡 전 재료를 적용한 것과 동일한 수준의 휨거동 양상이 나타나는 것을 확인하였고, r_f/t 를 5로 하여 보다 급격한 절곡 상세를 가진 해석모델에서도 충분한 휨연성을 갖는 것으로 평가되었다. 본 해석모델 절곡 보의 휨강도는 AASHTO LRFD 비탄성 설계기준강도에 도달하고 있으며, r_f/t 가 5인 보에서 휨연성도는 약 15% 내외 저감되지만 최소 4 이상 확보하며 충분한 수준을 유지하는 것으로 해석되었으나, 추후 전체 두께에 대한 절곡 영향을 포함하고 변형시효 영향을 적극적으로 고려한 보다 다양한 재료실험을 시행하여 추가적인 검토가 요구된다.

본 연구 대상에서 고려되지 못한 강재, 판두께 및 다양한 단면 형상에 대해서도 유사한 검토 연구가 진행되어 유효한 절곡 상세에 대해 충분한 데이터베이스가 확보될 필요가 있다. 추가적인 재료시험 뿐 만 아니라 실구조 규모의 실험을 통해 본 해석적 평가 방안에 대해 검증된다면 보다 의미 있는 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 절곡에 의한 변형시효에 대해서도 심화연구 된다면 본 해석적 검토 방안이 보다 유의미한 결과를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부의 건설기술혁신사업(11CCTI-B058803-02-000000) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- AASHTO (2007) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C.
- ABAQUS (2011) Analysis User's Manual, Version 6.11
- ABAQUS (2011) Theory Manual, Version 6.11
- Barth, K.E. and White, D.W. (1998) Finite Element Evaluation of Pier Moment-Rotation Characteristics in Continuous-Span Steel I Girders. *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 8, pp. 761-778.
- Gardner, L., Saari, N., and Wang, F. (2010) Comparative experimental study of hot-rolled and cold-formed rectangular hollow sections. *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp.495-507.
- Guo, Y.J., Zhu, A.Z., Pi, Y.L., and Francis, T.L. (2007) Experimental study on compressive strengths of thick-walled cold-formed sections. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, pp. 718-723.
- Homma, K., MIKI, C., SOYA, I., SASAO, H., OKUMURA, T., and HARA, S. (1997) A Study on Strain Aging of Cold Worked Structural Steel and Allowable Cold Working Radius. *Journal of Infrastructure Planning and Management*, No. 570, 1-40, pp. 153-162.
- Kim, M.Y. (2001) The Strength of compression members for flange-to-web width ratios in cold-formed plain channels. Master dissertation, Dong-guk University, Seoul, Korea.
- Korea Ministry of Construction & Transportation, (2005) Highway Bridge Standard Specification.
- Korea Road and Transportation Association, (2010) Highway Bridge Design Specifications.
- Pi, Y.L., Put, B.M., and Trahair, N.S. (1999) Lateral buckling strengths of cold-formed Z-section beams. *Thin-Walled Structures*

tures, Vol. 34, Issue-1, pp.65-93.
Quach, W.M., Teng, J.G., and Chung, K.F. (2010) Effect of the manufacturing process on the behaviour of press-braked thin-walled steel columns. *Engineering Structures*, Vol. 32, Issue.11, pp. 3501-3515.
White, D.W. and Barth, K.E. (1998) Strength and Ductility of Com-

pact-Flange I-Girders in Negative Bending. *J. Construct. Steel Res*, Vol. 45, No. 3, pp. 241-280.

◎ 논문접수일 : 2013년 01월 10일
◎ 심사의뢰일 : 2013년 01월 15일
◎ 심사완료일 : 2013년 01월 28일