

양단 균일 모멘트를 받는 수평곡선 I형 강재 거더의 횡-비틀림 거동 및 강도 산정 방안

이기세¹ · 이만섭² · 최준호³ · 강영종^{4*}

¹연구교수, 고려대학교, 건축사회환경시스템공학부, ²공학박사, Senior Project Director, Bridge International, COWI A/S
³공학박사, Department of Ocean Engineering, Texas A&M University, ⁴교수, 고려대학교, 건축사회환경시스템 공학부

Strength and Lateral Torsional Behavior of Horizontally Curved Steel I-Girders Subjected to Equal End Moments

Lee, Keesei¹, Lee, Manseop², Choi, Junho³, Kang, Youngjong^{4*}

¹Research Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea

²Ph.D, Senior Project Director, Bridge International, COWI A/S, Kongens Lyngby, 2800, Denmark

³Ph.D, Department of Ocean Engineering, Texas A&M University, Texas, 77843, United States

⁴Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea

Abstract - A curved member should resist bending and torsional moments simultaneously even though the primary load is usually supposed to be gravitational load. The torsional moment causes complicate stress state and also can result in early yielding of material to reduce member strength. According to analysis results, the strength of a curved member that has 45 degrees of subtended angle could decrease more than 50% compare to straight girder. Nevertheless, there have been very few of researches related with ultimate strength of curved girders. In this study, various kinds of stiffness about bending, pure torsion and warping were considered with a number of models in order to verify the main factor that affects ultimate behavior of curved girder. Lateral and rotational displacement of curved member were introduced as lateral-torsional-vertical behavior and bending-torsional moment interaction curve was derived. Finally, a strength equation for ultimate moment of horizontally curved steel I-girders subjected to equal end moments based on the interaction curves. The equation could take account of the effect of curvature, unbraced length and sectional properties.

Keywords - Steel, Curved girder, Nonlinear, Strength, Torsion

1. 서론

곡선거더는 직선 거더와 달리 기하학적 형상으로 인하여 필연적으로 비틀림 모멘트에 저항하여야 한다. 이러한 비틀림 모멘트가 I형 거더에 작용할 시에는 순수 비틀림과 휨에 의하여 응력상태가 복잡해지게 된다. 응력의 불균일 분포는

재료에 이른 항복을 야기할 수 있으며, 부재의 극한 강도를 저하시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 곡선 부재의 설계는 보다 신중하고 면밀한 접근을 필요로 하며, 경우에 따라 정밀한 구조해석을 요한다. 그럼에도 불구하고 현행 설계 기준은 곡률 효과를 반영한 강도 산정 방법을 제시하고 있지 못한 실정이다. 우리나라의 도로교 설계기준(2016)^[1]은 직선 거더에만 국한된 설계 방안을 제시하고 있을 뿐, 평면 외방향으로 작용하는 모멘트나, 응력의 불균일 분포에 대한 언급이 없으며, 특히 비틀림 거동에 대한 사항은 다루고 있지 않다. 곡선교 설계를 다루고 있는 설계 기준은 현재 미국의 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2014)^[2]가 유일한데, 이 또한, One-third rule을 이용한 응력 검토방

Note.-Discussion open until August 31, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 20, 2017; revised November 26, 2017; approved on November 26, 2017.

Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-927-7715 Fax. +82-2-921-5166

E-mail. yjkang@korea.ac.kr

안만을 제안하고 있을 뿐, 곡률 효과를 고려한 부재 강도에 대한 언급은 전무한 실정이다. 곡선교 전용 설계지침으로, 일본의 한신 고속도로 공단 설계지침(1988)^[3]이나 미국의 AASHTO Design Guide Specifications(2003)^[4]을 예로 들 수 있으나, 여기에서도 곡선 거더의 횡-비틀림 거동을 반영한 강도 감소 현상을 명확히 반영하고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 현재까지 자세히 다루어 지지 않았던 I형 강재 곡선 거더의 거동 양상을 유한요소 해석을 통해 분석하는 한편, 곡률에 따른 부재 강도 산정 방안을 제시한다. 해석은 양단 균일 모멘트를 받는 단순 지지된 부재를 대상으로 하였으며, 재료/기하 비선형성과 잔류응력을 고려하였다.

2. 선행 연구 분석

St Venant에 의하여 비틀림 이론이 정립된 이후 곡선 거더에 의한 연구가 활발히 수행되어졌다. Fucumoto *et al.* (1981)^[5]은 Transfer Matrix를 이용하여 비틀림 대변위를 보이는 곡선 거더에 대한 거동에 대한 연구를 수행 하였으며, 이후 Yoshida와 Maegawa(1983)^[6]는 곡선 부재의 극한 강도에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 이들의 연구는 비틀림과 휨의 상호작용을 고려하지 않았다.

한편, 곡선 보 요소에 대한 연구 또한 활발히 이루어 졌다. Dabrowski(1968)^[7]에 의하여 곡선 보에 대한 미분방정식이 정립된 이후 Morris(1968)^[8], Ho(1972)^[9], El-Amin(1976)^[10], Hsu(1989)^[11]에 의해 빔요소 정식화에 대한 연구가 수행 되었으며, 최종적으로 Kang(1992)^[12]과 Kang and Yoo(1994)^[13]에 의하여 곡선보 이론이 정립되었다. 그러나 곡선 거더의 강도에 관한 연구는 상대적으로 그 수가 적다. Liew *et al.* (1995)^[14]은 I형 수평 곡선 거더에 대하여 잔류응력을 고려한 재료 및 기하 비선형 해석을 수행하고 이를 실험 결과와 비교 하였으며 Fukumoto(1981)^[5]의 연구결과를 이용하여 강도 산정 방안을 제시하였다. 그러나 그 형태가 복잡하고, 정확도가 다소 떨어지는 단점이 있다. Shanmugam *et al.* (1995)^[15]는 실험을 통해 수평곡선 I형 거더의 거동을 규명하고자 하였으며, 이를 바탕으로 곡률과 극한 강도간의 관계를 설명하였다. 그러나 이 연구는 휨-비틀림 상호작용보다는 잔류응력의 영향에 주안점을 두고 있으며, 일반식을 도출하고 있지 않다.

Pi and Trahair(1997)^[16]는 기하 비선형을 고려한 수평곡

선 I형 거더의 거동에 대한 연구를 수행하였고, 이후 Pi와 Bradford(2000)^[17]는 이를 발전시켜 곡률 중심각 별로 극한 강도 지배 인자를 분류하였다. 이러한 결과를 바탕으로 Pi와 Bradford(2001)^[18]는 수평곡선 거더의 휨-비틀림 모멘트 상호 작용식을 제안하였다. 이들의 연구 결과는 설계를 위한 검토식으로써 큰 의의를 지닌다 할 수 있다. 그러나 그들의 연구 결과는 다소 보수적인 결과를 보이며, 부재의 강도 산정 방안을 제시하지는 못하였다.

Nishida *et al.* (1978)^[19]은 직접적으로 수평 곡선 I형 거더의 좌굴강도를 산정할 수 있는 식을 최초로 제시하였다(식 (1)).

$$M_{cr(cu)} = \sqrt{1 - \frac{L^2}{\pi^2 R^2}} \sqrt{\left(\frac{\pi^2 EI_y}{L^2}\right) \left(GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{L^2}\right)} \quad (1)$$

여기서, L =unbraced length

R =radius of curvature

G =shear modulus

J =torsional constant

C_w =warping constant

그러나 식 (1)은 직선거더의 선형탄성좌굴강도에 일종의 강도 저감 계수를 곱한 것으로 해석할 수 있으며, L^2/R^2 은 단지 곡률 중심각의 제곱인 것을 볼 때, 단면의 특성은 고려되지 않은 것으로 볼 수 있다. 뿐만 아니라 식 (1)은 선형 탄성 좌굴 거동에만 적용될 수 있다는 한계를 지닌다.

수평곡선 I형 강재 거더의 비탄성 좌굴강도 산정에 관련한 가장 최근의 연구는 Yoo *et al.* (1996)^[20]에 의한 것으로, Kang and Yoo(1994)^[13]에 의해 정립된 곡선보 이론을 바탕으로 하고 있다. 이 역시 Nishida *et al.* (1978)^[19]의 연구와 유사한 계 식 (2)에서 보는 바와 같이 강도 감소 계수를 적용하고 있다.

$$M_{cu} = (1 - \gamma\theta^\beta)^\alpha \times M_{st} \quad (2)$$

여기서, M_{cu} =ultimate strength of curved member

M_{st} =ultimate strength of straight member

$\alpha=2.152, \beta=2.129, \gamma=0.0158, \theta$ =subtended angle

위 식은 Nishida *et al.* (1978)^[19]의 결과와 달리 선형탄성 좌굴강도 뿐 아니라 비탄성 좌굴 강도까지 적용할 수 있으나 이 또한 강도 저감 효과에 곡률 중심각만을 고려했다는 점에

서 그 한계를 지닌다. 국내에서는 상대적으로 관련 연구가 부족한 실정이다. 수평곡선 I형 거더에 관한 연구는 주로 자유진동 특성에 관한 것이으며^{[21],[22],[23]} 극한강도에 대한 연구는 소수라 할 수 있다. Kim^[24]은 휨-비틀림 상호작용이 곡선 거더의 극한 강도에 미치는 영향을 조명하였으나 그 대상이 강합성 제형 박스거더라는 점에서 본 연구와 차이가 있다. 한편, Lim *et al.*^[25]은 I형 거더에 편심하중을 재하 함으로써 비틀림 모멘트가 I형 거더의 거동에 미치는 영향을 해석적으로 규명하였고, Kim^[26]은 파형 복부판을 적용한 I형 거더의 극한거동에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 두 연구는 뚜렷한 강도 산정 방안을 제시하지는 않았다. 본 연구에서는 단면의 다양한 강성(Rigidity)을 독립적으로 고려할 수 있는 해석 모델을 선정하고, 상용 프로그램인 Abaqus 6.13을 이용하여 매개변수 해석을 통해 극한 강도에 영향을 미치는 인자를 분석하였다. 그리고 최종적으로, 비지지 길이가 짧은 수평 곡선 강재 거더에 대한 극한강도 산정식을 제안하였다.

3. 구조해석

3.1 해석 개요

본 연구에서는 양단 균일 모멘트를 받는 단순 지지된 직선 및 곡선 부재를 대상으로 재료 및 기하 비선형 해석을 수행하였다. 거더는 4절점 쉘요소(S4R)를 이용하여 모델링 하였으며, 재료는 315 MPa의 항복응력을 갖는 강재로, 완전 탄소성거동을 가정하였다. 또한 각 모델에는 Fig. 1과 같이 Galambos가 제시한 잔류응력 형태를 도입하였으며, 이때 r 은 최대 압축 잔류응력 계수, g 는 최대 인장 잔류응력 계수를 나타낸다. 재료의 항복 판별은 Von Mises Yield Criteria가 적용되었다.

단순 지지를 모사하기 위한 경계조건은 Fig. 2(a)와 같으며, 변위 구속은 Fig. 2(b)에 나타내었다. 양단 고정 모멘트는 부재의 양 끝에 일련의 집중하중을 재하하여 모사하였으며, 그 형태는 Fig. 3(a)에 나타내었다. 그러나 이러한 형태의 하중을 재하할 시, 하중 재하 지점에 과도한 응력 집중으로 국부적인 파괴를 유발할 가능성이 있으므로 Fig. 3(b)와 같이 양단에 보요소(B31)를 부가적으로 모델링하여(Dummy Beam) 국부 파괴를 방지하였다.

한편, 이러한 보요소의 활용은 양단에서의 변위를 구속하여 부재의 거동 및 강도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 국부 파

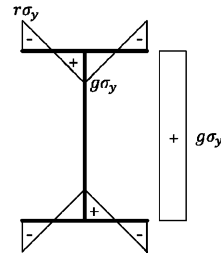


Fig. 1. Residual stress pattern

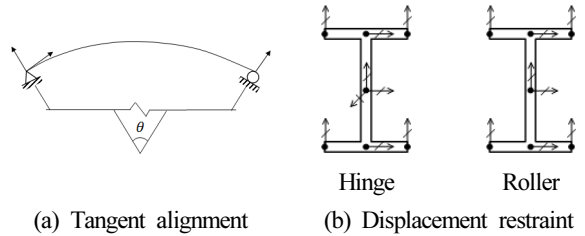


Fig. 2. Boundary condition

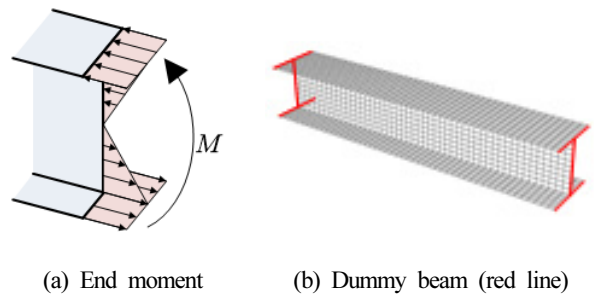


Fig. 3. Loading condition and dummy elements

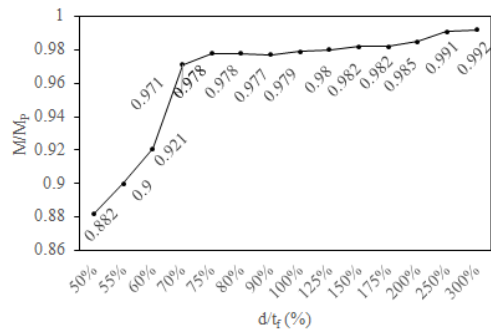


Fig. 4. Parametric study for various dummy beams

괴를 방지하는 범위 내에서 최소한의 강성을 갖도록 하여야 한다. 따라서 본 해석에 앞서 Dummy Beam의 강성을 결정하는 매개변수 해석을 실시하고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

해석은 소성 비지지 길이 L_p 보다 짧은 기간장을 갖는 직선 거더를 대상으로 실시하였으며, 이에 따라 부재는 소성 모멘트 M_p 를 저항할 수 있어야 한다. Dummy Beam은 원형 단면을

갖는 것으로 가정되었으며, 그 직경(d)과 플랜지 두께(t_f)의 비로써 강성을 나타낼 수 있다. 해석 결과를 통해 본 연구에서는 모든 모델에 대하여 플랜지 두께의 75%의 직경을 갖는 원형 단면 보요소를 가력부에 배치하여 국부 파괴를 방지하였다.

직선거더의 경우 횡-비틀림 좌굴을 유도하기 위해서는 초기 변형을 도입하여야 한다. 그러나 곡선 거더의 경우, 초기곡률은 그 자체로 초기 결함으로 간주될 수 있으며, 이에 따라 부가적인 초기변형 없이도 횡-비틀림 변위를 보이게 된다. 그러나 본 연구에서는 동일 조건하에 직선거더와 곡선 거더의 거동 및 강도를 비교하기 위하여 곡선거더에도 직선 거더와 동일한 양의 횡방향 및 회전방향 변위를 초기 결함으로 적용하였다. 초기결함은 거더중양에 $L/500$ 의 횡변위, $1/500$ 라디안의 회전방향 변위가 적용되었다.

3.2 극한 모멘트 강도

직선 거더와 달리 곡선 거더는 양단 균일 모멘트가 작용할 경우 시간에 걸쳐 모멘트 분포가 변화하게 되며, 평형을 만족 시키기 위하여 비틀림 모멘트 또한 발생하게 된다. 양단 고정 모멘트를 받는 거더의 휨 모멘트 선도 및 비틀림 모멘트 선도는 Figs. 5, 6과 같다. 두 선도에서 세로축은 대응하는 위치에 작용하는 단면력을 재하된 양단 모멘트로 나누어 그 비율을 표시한 것이다. 휨모멘트의 경우, 직선거더는 전 경간에 걸쳐 균일하게 분포하나, 곡률 중심각이 45° 인 부재에 대해서는 지간의 중앙에서 재하한 모멘트보다 약 10%정도 더 큰 모멘트가 작용하게 된다. 따라서 곡선 거더의 경우, 부재 내에 작용하는 최대 모멘트로서 나타내어지는 거더의 극한 강도는 중앙부에 작용하는 모멘트가 되어야 하며, 본 연구에서는 중앙 단면에 작용하는 응력을 단면력으로 환산하여 이를 강도로 산정하였다.

3.3 수평곡선 I형 거더의 거동 양상

전술된 조건 하에서 곡선 거더의 거동 양상을 분석하기 위한 해석을 진행 하였다. 해석 모델의 단면은 현대제철에서 생산하는 기성품(H형강 350×350)을 대상으로 하였으며 Table 1에 나타난 바와 같이 다양한 곡률 중심각과 비지지 길이를 고려하였다. 한편, 국부좌굴에 대한 안정성은 식 (3)~(4)와 같이 2014 AASHTO LRFD Bridge Design Specification에서 제공하는 요소 판별식으로써 검토 되었다. 플랜지와 복부판 모두 조밀로 판별 되었으며, 이에 따라 해당 단면은 국부 좌굴에 안정한 것으로 판단된다.

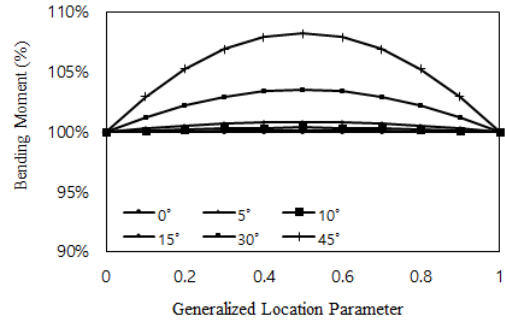


Fig. 5. Bending moment diagram due to subtended angle

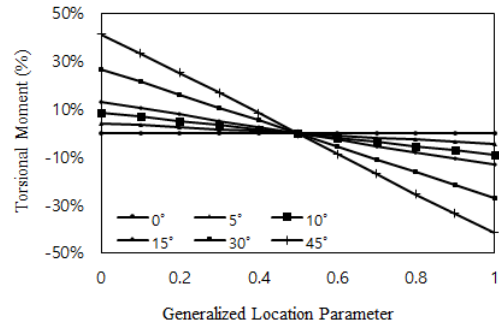


Fig. 6. Torsional moment diagram due to subtended angle

Table 1. Model parameters

Subtended angle	0°, 3°, 5°, 7°, 15°, 25°, 40°	6 Models
Unbraced length	60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 120%, 130%, 140%, 150%, 200%	11 Models
Total		66 Models

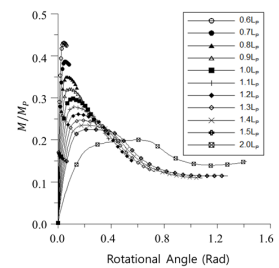
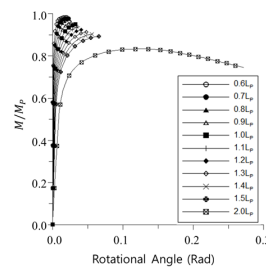


Fig. 7. Moment-rotational angle curve; straight girder Fig. 8. Moment-rotational angle curve; curved girder (40 Deg)

$$\text{Flange : } 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 9.82 > \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} = 9.21 - \text{OK} \quad (3)$$

$$\text{Web : } 1.12 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}} 64.66 > \frac{D}{t_w} = 27.58 - \text{OK} \quad (4)$$

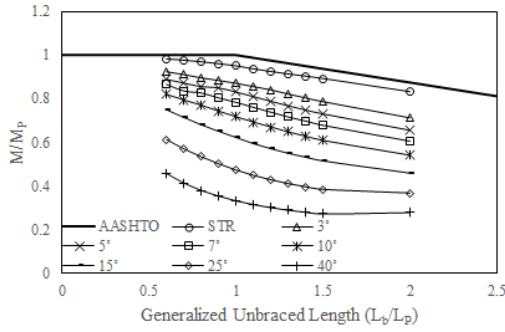


Fig. 9. Strength curve

Figs. 7과 8은 각각 직선거더와 곡률중심각 40°인 모델의 모멘트-회전변위 곡선을 나타낸 것이다. 이때 작용하는 모멘트는 거더의 중앙부에 작용하는 응력을 이용하여 계산 되어졌으며, 이를 소성모멘트 M_p 로 나누어 정규화하였다. 수직 변위와 평면 외방향 변위는 회전변위와 그 양상이 유사하다는 점을 명시한다. 회전 변위에서, $2.0L_p$ 의 비지지 길이를 갖는 직선거더는 최대 변위가 0.3rad(17.2deg)인 반면, 동일한 조건 의 곡선거더는 1.5rad(86.0deg)의 큰 회전 변위를 보였다.

Fig. 9는 해석 결과를 바탕으로 작성된 강도 곡선으로 각 부재의 강도를 2016 AASHTO LRFD Bridge Specifications에 제시된 직선거더의 강도 곡선과 비교한 것으로, 초기곡률의 도입이 부재 강도를 크게 저하시킴을 알 수 있다. 이는 휨-비틀림 모멘트 상호작용에 의한 것으로, 강도 감소폭이 매우 크므로 해석 및 설계 시 반드시 고려되어야 할 점이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 소성 비지지 길이 이하의 지간을 갖는 부재에 대하여 강도를 추정하는 방법에 대해 집중적으로 논의 하였다.

4. 수평 곡선 거더의 휨-비틀림-수직 거동

양단 균일 모멘트를 받는 직선 I형 거더의 경우 하나의 플랜지는 작용하는 압축응력의 영향으로 인하여 약축으로 좌굴을 일으키려 하지만, 복부판에 의해 연속으로 지지되어 있기 때문에 부재 전체에 수평방향 및 회전방향 변위를 일으키게 된다. 이러한 변위는 작용하는 외력이나 내력에 수직방향으로, 좌굴 거동이라 할 수 있으며 이를 횡-비틀림 좌굴이라 한다(Lateral Torsional Buckling: LTB). 그러나 비틀림 모멘트가 항상 작용하고 있는 곡선 거더의 경우 횡방향 및 비틀림 방향 변위는 필연적으로 일어나게 되며, 이러한 거동을

Table 2. Model parameters

Group #1	Fixed C_w, J , Variable I	5 Sections
Group #2	Fixed I, J , Variable C_w	5 Sections
Group #3	Fixed C_w, I , Variable J	5 Sections
Span length	(75, 80, 90, 95, 100)% of L_p	
Subtended angle	0, 5, 10, 15, 30 Deg	
Total	15 × 6 × 5 = 450 Models	

좌굴로 정의하는 데는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 모멘트를 받는 수평곡선 I형 거더의 거동을 횡-비틀림-수직 거동(Lateral Torsional Vertical Behavior: LTV)으로 명명하고, 그 강도를 추정할 수 있는 방안을 모색한다.

3절의 해석결과에서와 같이 곡률의 증가는 부재의 거동 및 강도에 크게 영향을 미칠 수 있다. 비틀림 모멘트는 균일 비틀림과 불균일 비틀림으로 나누어 생각할 수 있으며 각각 비틀림 상수 J 와 뒀 상수 C_w 와 연관 지어 진다. 또한 작용하고 있는 모멘트는 단면 2차 모멘트 I 와 연관 지을 수 있다. 따라서 모멘트를 받는 곡선 거더의 경우 위의 세 가지 강성(휨 강성, 순수비틀림강성, 뒀강성)의 영향을 받을 것이라 추정할 수 있으며, 본 절에서는 이 중 가장 크게 영향을 미치는 인자를 해석을 통해 밝히기로 한다.

총 450개의 부재가 해석 모델로 선택되었으며, 곡률중심각, 비지지 길이와 더불어 여러 가지 단면이 고려되었다. 해석 모델은 세 가지로 구분할 수 있으며, 이는 전술한 세 가지 강성(Rigidity)과 관련이 있다. 150개의 모델로 이루어지는 첫 번째 그룹의 경우 다섯 개의 단면이 고려되며, 각 단면은 거의 같은 뒀강성 및 비틀림 강성을 지니나 휨강성은 서로 다르다. 두 번째 그룹 역시 150개의 모델과 다섯 가지의 단면을 포함하며, 각 단면은 거의 같은 비틀림 강성 및 휨 강성을 지니나 뒀 강성은 서로 다르다. 마지막 그룹은 거의 같은 뒀 강성 및 휨 강성을 지니나 비틀림 강성이 서로 다르다. 이러한 변수 선정으로 강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 도출하여 최종적으로 강도 산정식을 유도할 수 있다. Table 2는 본 해석에 대한 매개변수를 나타낸 것이다.

4.1 LTV 해석결과; Group #1

Table 3은 첫 번째 그룹의 단면치수와 해당하는 물성치를 나타낸다. 여기서 t_f 는 상하부 플랜지 두께, b_f 는 플랜지 폭, t_w 는 복부판 두께, h 는 상부플랜지 중앙에서 하부플랜지 중앙까지의 높이를 나타낸다. 전술한 바와 같이 다섯 개의 단면은

거의 동일한 비틀림 및 휨 강성을 지니나 휨강성은 서로 다르다.

Fig. 10은 비지지 길이와 곡률중심각에 따른 극한 강도 변화로, Sec#4에 대한 결과를 대표적으로 나타낸 것이다. 직선 거더는 최대 모멘트가 소성 모멘트 M_p 와 같았으며 해석에 고려된 모든 모델이 소성 비지지 길이 L_p 보다 작음을 고려할 때, 이는 타당하다. 그러나 부재의 곡률이 증가함에 따라 극한 강도는 급격히 감소하여 곡률 중심각이 30° 인 모델은 직선 부재의 강도와 비교하였을 때 절반 수준을 보였다. 또한 곡선 부재의 경우 비지지 길이가 증가함에 따라 강도가 점진적으로 감소하는 경향을 보였으며, 이는 직선 부재의 비탄성 좌굴 강도곡선의 경향과 매우 유사하다.

반면 Figs. 11, 12는 휨강성에 따른 극한 모멘트 변화를 나타낸 그래프로 각각 직선 거더와 곡률중심각이 30° 인 부재들의 결과를 대표적으로 보인 것이다. 이때 왼쪽 수직축은 극한 모멘트를 소성 모멘트로 나누어 정규화한 것이며, 오른쪽 수직축은 Sec#1의 휨강성 EI 를 기준으로 Sec#2~5까지의 휨강성을 상대적으로 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 모든 단면은 거의 동일한 비틀림 및 휨 강성을 지니고 있으며, 휨강성은 Sec#1에서부터 점차 감소하여 Sec#5의 휨강성은 Sec#1의 약 45%수준이다. 그러나 직선 및 곡선 거더의 극한 강도는 휨강성과는 거의 무관한 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 곡률이 다른 모델에서도 동일하였다.

4.2 LTV 해석결과; Group #2

본 절에서는 Group#2의 해석 결과를 도시하였다. Table 4는 Group#2에 해당하는 단면들의 치수와 기하 물성치를 나타낸다. 각 단면은 거의 동일한 휨 강성 및 비틀림 강성을 가지고 있으나, 서로 다른 휨 강성을 지닌다. 이는 플랜지에 발생하는 휨 법선 응력과 휨 법선응력의 중첩으로 인한 조기 항복이 강도를 저하 시킬 수 있는 가능성을 해석적으로 규명하고자 함이다.

해석 결과에서 길이에 대한 영향은 Group#1과 동일한 결과를 보였음을 명시한다. 다시 말해, 곡선 거더의 경우 비지지 길이가 충분히 짧음에도 불구하고($L_b < L_p$) 비지지 길이가 길어질수록 강도가 저하되는 경향을 보였다. 한편, Figs. 13과 14는 직선 거더와 곡률 중심각이 30° 인 모델에 대하여 휨 강성의 변화에 따른 강도 변화를 나타낸 것이다. 이때 왼쪽 수직축은 극한 모멘트를 소성 모멘트로 나누어 정규화한 것이며, 오른쪽 수직축은 Sec#10의 휨강성 EC_w 를 기준으로 Sec#6~10까지의 휨 강성을 상대적으로 나타낸 것이다. 휨

Table 3. Section dimension & properties; group#1

	Sec#1	Sec#2	Sec#3	Sec#4	Sec#5
t_f (mm)	25	25	25	25	25
b_f (mm)	217.9	232.9	250.9	272.7	300
t_w (mm)	18.19	17.21	16.36	14.65	10
h (mm)	550	500	450	400	350
I (mm ⁴)	1.04×10^9	8.82×10^8	7.40×10^8	6.10×10^8	4.89×10^8
C_w (mm ⁶)	3.28×10^{12}	3.30×10^{12}	3.34×10^{12}	3.35×10^{12}	3.40×10^{12}
J (mm ⁴)	3.23×10^6	3.23×10^6	3.23×10^6	3.23×10^6	3.23×10^6

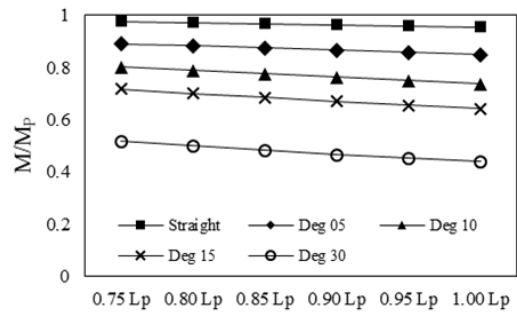


Fig. 10. Effect of unbraced length and curvature

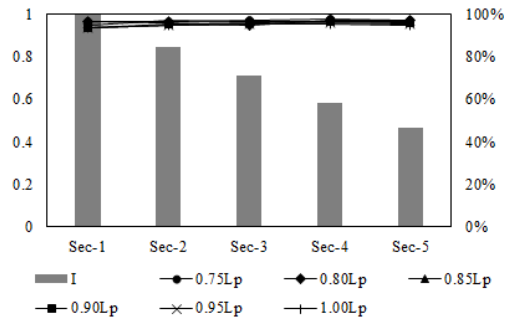


Fig. 11. Effect of moment inertia - straight girder

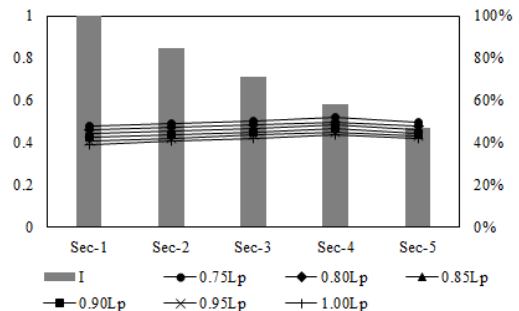


Fig. 12. Effect of moment inertia - curved girder (Deg 30)

강성과 마찬가지로, 휨 강성 또한 극한강도에는 큰 영향을 미치지 않았으며, 이는 플랜지에 발생하는 불균일 응력 분포

가 극한강도에는 큰 영향을 미치지 않음을 시사한다.

4.3 LTV 해석결과; Group #3

본 절에서는 Group#3의 해석 결과를 논의한다. Table 5는 각 단면의 치수와 기하학적 물 성치를 나타낸 것이며, 각 단면의 휨강성 및 뒹강성은 거의 동일하고 순수비틀림 강성 GJ 가 변하는 것을 확인할 수 있다.

Figs. 15~16은 직선과 곡률 중심각 30° 를 갖는 곡선거더에 대하여 비틀림 강성이 극한강도에 미치는 영향을 나타낸

것이다. 해석 결과 길이에 대한 영향은 앞선 두 가지 경우 (Group#1, Group#2)와 동일하였으나 극한강도는 비틀림 강성에 영향을 받고 있음이 나타났다. 직선 거더의 경우 소성모멘트에 도달할 때까지 횡 방향 및 회전방향 변위가 작으므로 비틀림이 극한강도에 미치는 영향은 크지 않다고 할 수 있다. 그러나 곡선 거더의 경우 하중 재하순간부터 비틀림 모멘트가 작용하며, 이는 각 요소에 전단 응력을 발생 시킨다. 이는 요소의 이른 항복을 야기하고 결과적으로 극한 강도를 감소시키게 된다. 꺾은선 그래프의 기울기는 비틀림 모멘트의 영향을 나타내며, 비틀림 모멘트가 곡률에 비례하여

Table 4. Section dimension & properties; group#2

	Sec#6	Sec#7	Sec#8	Sec#9	Sec#10
t_f (mm)	43	42	41.1	40.6	40
b_f (mm)	190	210	228	236	250
t_w (mm)	35	35	35	35	35
h (mm)	485	470	460	458	450
I (mm ⁴)	1.21×10^9	1.21×10^9	1.21×10^9	1.21×10^9	1.22×10^9
C_w (mm ⁶)	2.98×10^{12}	3.66×10^{12}	4.37×10^{12}	4.74×10^{12}	5.35×10^{12}
J (mm ⁴)	1.64×10^7	1.65×10^7	1.65×10^7	1.65×10^7	1.65×10^7

Table 5. Section dimension & properties; group#3

	Sec#11	Sec#12	Sec#13	Sec#14	Sec#15
t_f (mm)	48.8	46	44	42	40
b_f (mm)	250	250	250	250	250
t_w (mm)	35	35	35	35	35
h (mm)	420	429	435	444	450
I (mm ⁴)	1.22×10^9	1.23×10^9	1.22×10^9	1.23×10^9	1.22×10^9
C_w (mm ⁶)	5.66×10^{12}	5.57×10^{12}	5.50×10^{12}	5.49×10^{12}	5.44×10^{12}
J (mm ⁴)	2.43×10^7	2.17×10^7	1.98×10^7	1.81×10^7	1.65×10^7

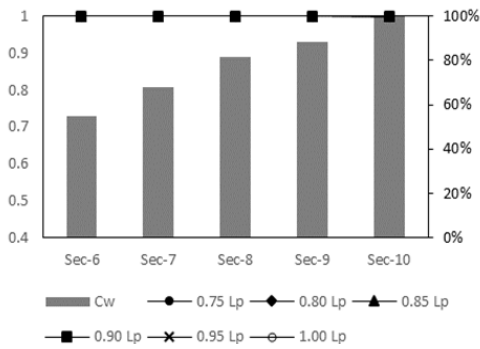


Fig. 13. Effect of warping constant - straight girder

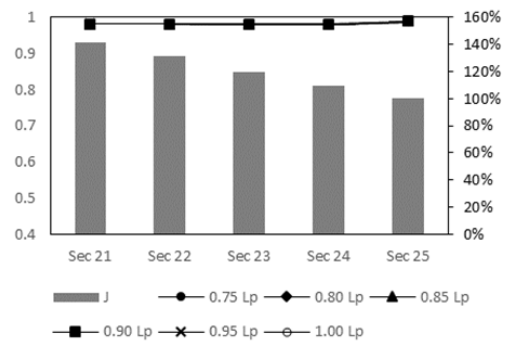


Fig. 15. Effect of torsional constant - straight girder

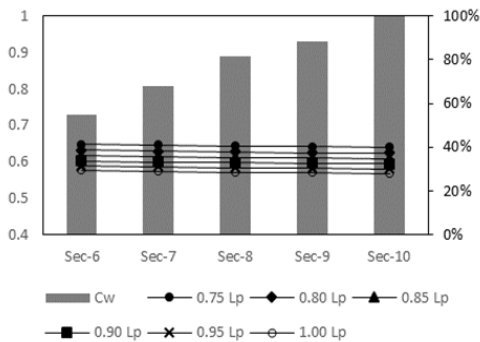


Fig. 14. Effect of warping constant - curved girder (Deg 30)

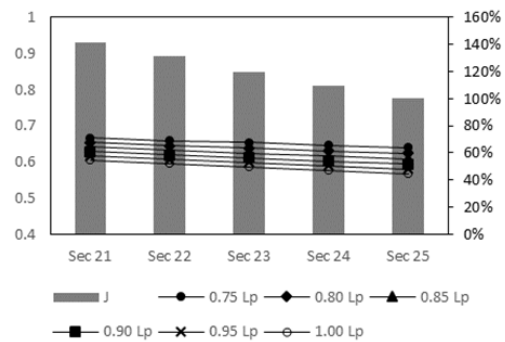


Fig. 16. Effect of torsional constant - curved girder (Deg 30)

커진다는 것을 상기하면(Fig. 5), 순수비틀림 강성은 곡률 효과의 영향으로 간주할 수 있다.

4.4 결과 분석

본 절에서는 해석 결과의 분석을 위해 각 모델의 파괴 모드를 분석하였다. 이를 위하여 Sec#5에서 비지지 길이 1.00 L_p 를 갖는 직선 거더와 곡선 거더(Deg30)를 대표 모델로 선정하여 각각의 파괴모드를 Figs. 17~18에 나타내었다.

먼저 직선 거더의 경우 법선 응력 분포는 Fig. 17(a)와 같다. 휨모멘트에 의하여 상하부 플랜지가 항복하고 부재의 강도인 소성 모멘트에 도달하게 된다. 따라서 직선 거더의 파괴는 법선 응력에 의한 전단면 항복에 의한 것이라 할 수 있다.

반면 곡선 거더의 경우, Fig. 18(a)와 같이 각 플랜지는 압축과 인장 응력을 동시에 받고 있음을 확인할 수 있다. 이는 휨 법선응력에 의한 영향이며, 곡선 거더의 플랜지의 한쪽 끝은 조기에 항복에 이를 수 있다. 그러나 플랜지의 부분항복만으로는 곡선 거더의 파괴 거동을 완전히 설명 할 수 없다. 따라서 Figs. 17(b)와 18(b)를 통하여 직선과 곡선 거더의 법선응력 및 Von-Mises 응력 분포를 비교 분석하였다. 직선거더의 경우 법선응력 분포와 Von-Mises 응력 분포가 거의 같은 형상을 띄는 반면, 곡선 거더는 법선응력에 의하여 부재가 항복하지 않았음에도 불구하고 Von-Mises 응력은 요소 전반에 걸쳐 항복에 도달했음을 확인할 수 있다. 이러한 항복이 플랜지뿐 아니라 복부판에까지 동일한 경향을 보인 것은 휨 법선 응력과 비틀림에 의한 전단응력의 상호작용으로 판단할 수 있으며, 이는 3.3절의 해석 결과에서 얻어진 결과와 일맥상통한다. 요컨대 휨 모멘트와 비틀림 모멘트가 동시 작용하

는 부재에서는 순수 비틀림의 부가적인 영향으로 인하여 각 요소가 항복하고 결과적으로 강도가 저하된다고 말할 수 있다.

5. 강도 산정 방안

곡선 거더에는 항시 비틀림 모멘트가 작용하므로 급작스러운 좌굴 현상이 아닌 점진적인 횡-비틀림-수직 거동을 보이게 된다. 이때, 불균일 비틀림은 플랜지의 끝단에 이른 항복을 야기할 수 있으나 극한 강도에 직접적인 영향을 주지는 않는다. 한편, 균일 비틀림으로 인하여 발생하는 전단응력은 법선응력과 상호작용을 일으켜 각 요소의 항복을 야기하며 이는 부재의 강도를 저하시키는 요인으로 작용한다. Figs. 19~20은 Sec#5중 1.00 L_p 의 비지지 길이를 갖는 직선 거더와 곡률중심각 30°인 곡선 거더에 대하여 극한 상태에서 전단응력 및 법선응력분포를 나타낸다. 전단 응력의 경우 양단에서 그 크기가 크고 중앙부로 갈수록 그 크기가 줄어들며, 이러한 양상은 Fig. 6의 비틀림 모멘트 선도와 그 양상이 동일하다. 직선 거더의 경우 최대 전단응력은 복부판에서 발생했으며 그 크기는 67.2MPa이다. 이때 압축 플랜지는 315MPa의 압축응력을 받고 있어 항복한 상태로, 파괴 모드는 휨에 의한 것이라 할 수 있다. 반면 곡선 거더의 경우, 최대전단응력이 지점부 부근 플랜지에서 발생 하였으며 그 크기는 181.9MPa로 전단항복응력에 가깝다. 가해진 외력이 0.5 M_p 에도 못 미치는 것을 고려하면 곡선 부재의 파괴는 주로 균일 비틀림에 의한 것이라 판단할 수 있다.

한편, 곡선 부재의 강도에 영향을 미치는 다른 한 가지 요인으로 비지지 길이를 생각할 수 있다. 해석 결과를 볼 때 곡

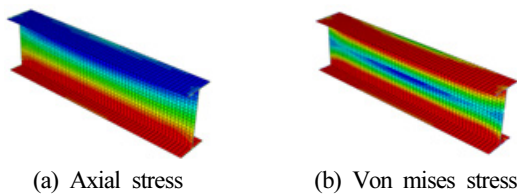


Fig. 17. Failure mode of straight girder

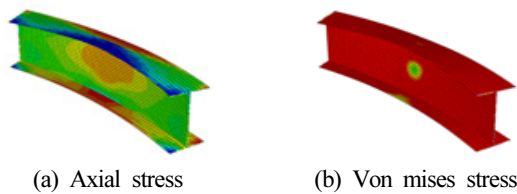


Fig. 18. Failure mode of straight girder

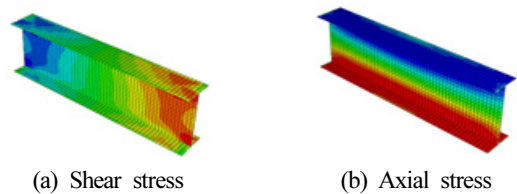


Fig. 19. Stress distribution of straight girder

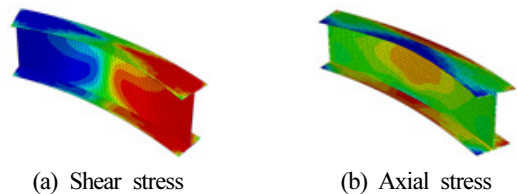


Fig. 20. Stress distribution of straight girder

선 거더는 소성 비지지 길이 L_p 보다 짧은 구간을 갖는 부재에서 또한 길이에 따른 강도 변화를 보였다. 따라서 극한 강도에 영향을 미치는 인자는 가해진 비틀림 모멘트와 비지지 길이, 그리고 단면의 비틀림 강성이라 할 수 있다.

단면 강도 산정 측면에서 순수 비틀림 모멘트의 영향을 고려하기 위해서는 각 단면에 가해지는 비틀림 모멘트를 정규화 할 필요가 있다. 본 연구에서는 외력에 의하여 발생하는 1차 비틀림 모멘트는 자유 물체도를 이용하여 Fig. 6과 같이 구하고, 최대 비틀림 모멘트는 단면의 소성 비틀림 모멘트로 정규화 하였다. 소성 비틀림 모멘트는 균일 비틀림과 불균일 비틀림에 대한 소성 비틀림 모멘트의 합으로 나타낼 수 있으나, 이 중 균일 비틀림이 곡선 거더의 강도에 영향을 미치므로 본 연구에서는 식 (5)를 사용하여 균일 비틀림에 대한 소성 모멘트 T_p 를 구하고(Yong-Lin Pi *et al.* 2000^[17]) 이를 이용하여 작용하는 비틀림 모멘트를 정규화하였다.

$$T_p = \frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} \left[b_f t_f^2 \left(1 - \frac{t_f}{3b_f} \right) + (h - 2t_f) \frac{t_w^2}{2} + \frac{t_w^3}{6} \right] \quad (5)$$

여기서, f_{yo} =yield stress

b_f =flange width

h =depth of section

t_f =thickness of flange

t_w =thickness of web

다음으로 휨 모멘트와 비틀림 모멘트간의 관계를 살펴볼 필요가 있다. 부재의 모멘트 강도는 정규화된 비틀림 모멘트 (T/T_p)의 함수로 나타낼 수 있으며 각 해석 결과에 대하여 휨-비틀림 간의 관계를 분석하였다. Fig. 21은 Sec#15에 대한 휨-비틀림 관계를 대표적으로 도시한 것이다. 이 그래프는 곡선 부재의 강도에 영향을 미치는 세 가지 인자를 모두

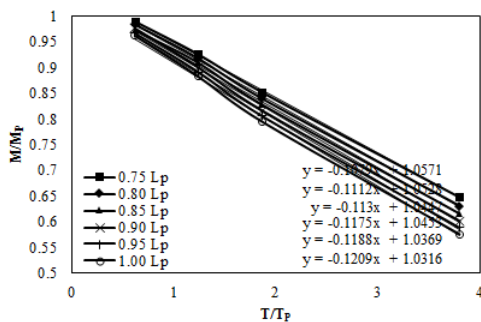


Fig. 21. M-T relationship; Sec#15

포함하고 있으며, 이들에 대한 분석을 통해 강도식을 도출해 낼 수 있다. 도시한 바와 같이 상호 작용 그래프는 직선의 형태에 매우 가까우며 이에 따라 1차식 형태의 보간식을 얻을 수 있다. 이때 평균 R^2 값은 0.9994이며, 보간을 통하여 얻어진 일차식의 기울기는 초기 곡률에 의한 비틀림 모멘트의 영향을, y절편은 비지지 길이의 영향을 반영한다. 각 해석 결과에 대한 기울기와 y절편을 비지지 길이에 따라 정리하여 다시 한 번 보간 해석을 실시하였다. 그 결과 휨-비틀림 상관식의 기울기는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, y절편은 식 (7)과 같이 얻어질 수 있다.

$$-0.046\ln(x) - 0.1212 \quad (6)$$

$$1.03096x^{-0.085} \quad (7)$$

여기서, $x = L_b/L_p$

L_b = Unbraced Length

L_p = Compact Unbraced Length

이를 최종적으로 정리하여 간단히 나타내면 곡선 부재의 모멘트 강도는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{M}{M_p} = (-0.046\ln x - 0.123) \frac{T_{\max}}{T_p} + 1.04x^{-0.085} \leq 1 \quad (8)$$

여기서, $x = L_b/L_p$

T_{\max} = Maximum Torsional Moment calculated by 1st order analysis

T_p = plastic uniform torsional moment

결론적으로 곡선 부재의 모멘트 강도는 비지지 길이와 비틀림 모멘트의 함수로 나타내어 질 수 있다. 강도식에서 좌변의 첫 번째 항은 음의 부호를 띠고 있으며 이는 작용하는 비틀림 모멘트에 의한 강도 감소분을 나타내고, 이는 직선 거더에서 0이 된다. 따라서, 본 식은 직선 및 곡선 거더에 적용할 수 있는 일반적인 강도 식으로써 그 의미를 지닌다.

6. 결과 비교

제시된 강도 산정식을 검증하기 위하여 본 해석에서 고려되지 않은 임의의 단면에 대한 구조해석을 추가로 수행한 뒤

그 결과를 강도식에 의한 예측값 및 선행연구와 비교하였다. 해석 단면에 대한 제원은 Table 6에 나타내었다. 검증에 위한 구조 해석 모델은 총 60개로, 각 단면에 대하여 비지지 길이는 $0.75L_P$, $0.80L_P$, $0.85L_P$, $0.90L_P$, $0.95L_P$, $1.00L_P$, 곡률 중심각은 0° , 10° , 20° , 30° , 40° 을 고려하였다.

두 단면 중 대표적으로 Sec#16에 대한 비교 결과를 Table 7에 나타내고 그 강도 곡선을 그래프의 형태로 Fig. 22에 보였다. Yoo *et al.*(1996)^[20]의 식은 2절에 기술한 바와 같이 선형 탄성 좌굴 해석에 기반하여 강도 감소 계수를 적용하였으며

이를 직선 부재 강도에 곱하여 곡선 부재의 강도를 산정한다. 그러나 이러한 방법은 길이나 단면 특성을 반영할 수 없어, 결론적으로 극한강도를 과대평가할 수 있는 위험성을 내포한다.

반면 본 연구의 제안식은 소성 비지지 길이 L_P 보다 짧은 곡선 및 직선 거더의 강도를 효과적으로 계산할 수 있다. Fig. 22(b)에서 꺾은선 그래프는 제안식의 결과이며, 막대 그래프는 각 비지지 길이에 대한 평균 오차율(구조해석결과-제안식 결과)의 절대 값을 나타낸다. 제안식은 비지지 길이와 곡률이 증가할수록 강도를 실제보다 다소 작게 평가하고 있음을 알 수 있다. Sec#16과 17을 반영한 모든 검증 모델의 오차율은 최대 6.85%, 평균 0.88%로 매우 우수한 결과를 보이고 있다.

Table 6. Section dimension; verification models

	Sec#16	Sec#17
t_f (mm)	30	35
b_f (mm)	308	190
t_w (mm)	25	40
h (mm)	318	460

7. 결론

본 연구에서는 양단 고정 모멘트를 받는 수평곡선 I형 거더에 대하여 단면, 비지지 길이, 곡률을 매개변수로 하여 구

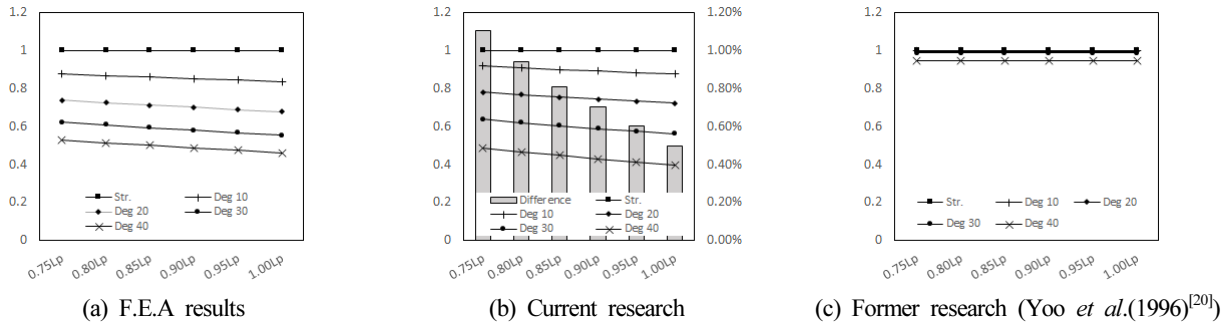


Fig. 22. Verification analysis results – sec#16

Table 7. Verification of suggested equation – sec#16

	$0.75L_P$	$0.80L_P$	$0.85L_P$	$0.90L_P$	$0.95L_P$	$1.00L_P$	$0.75L_P$	$0.80L_P$	$0.85L_P$	$0.90L_P$	$0.95L_P$	$1.00L_P$
	F.E.A results (M/M_P)						Former research (M/M_P)					
0°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1	1	1	1	1	1
10°	0.879	0.870	0.861	0.853	0.844	0.835	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
20°	0.740	0.727	0.714	0.702	0.690	0.678	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
30°	0.624	0.609	0.594	0.580	0.567	0.555	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988	0.988
40°	0.531	0.515	0.501	0.487	0.475	0.463	0.947	0.947	0.947	0.947	0.947	0.947
	Current study (M/M_P)						F.E.A results - current study (%)					
0°	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%
10°	0.920	0.911	0.902	0.893	0.886	0.878	-4.14%	-4.05%	-4.04%	-4.07%	-4.16%	-4.28%
20°	0.781	0.768	0.756	0.744	0.733	0.723	-4.14%	-4.16%	-4.20%	-4.27%	-4.34%	-4.44%
30°	0.639	0.621	0.605	0.590	0.576	0.563	-1.44%	-1.24%	-1.11%	-1.00%	-0.87%	-0.74%
40°	0.489	0.468	0.448	0.429	0.412	0.395	4.18%	4.75%	5.29%	5.83%	6.35%	6.86%

조해석을 실시하고 최종적으로 비지지 길이가 L_p 보다 짧은 부재들에 대한 강도 산정식을 제안하였다. 수평 곡선 부재는 비틀림 모멘트의 영향으로 단면에는 응력이 불균일하게 분포하게 되어 해석 및 설계가 매우 어렵다. 그러나 곡률 효과에 의하여 저하되는 부재 강도 산정에 관련한 연구는 그 수가 비교적 적고, 국내외 현행 설계 기준 또한 명확한 강도식을 제시하고 있지 않아 일반적인 설계에 대한 적용이 쉽지 않다. 현재 곡선 부재에 대한 설계기준은 미국의 2014 AASHTO LRFD Bridge Design Specification이 유일하나, 강도 측면에서는 직선 거더의 횡-비틀림 좌굴 강도식을 이용하고 One-third rule로써 법선응력을 검토하는 데 그치고 있다. 그러나 곡선 거더의 횡방향 및 비틀림 변위는 비틀림 모멘트에 의한 필연적 현상으로 좌굴 거동이라 단정 짓기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 양상을 횡-비틀림-수직거동 (Lateral Torsional Vertical Behavior: LTV)로 재정의 하고, 강도 및 거동에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 유한요소 해석을 통해 분석 하였다. 결론적으로 곡선 거더의 극한 거동은 비지지길이, 비틀림모멘트(곡률), 순수 비틀림 강성에 의해 지배 된다고 말할 수 있다. 본 연구에서는 위 세 가지 인자를 모두 고려하여 양단 균일 모멘트를 받는 단순 지지된 수평곡선 I형 거더에 대한 강도 산정식을 제안하였다. 제안식은 비틀림 모멘트의 영향을 고려할 수 있는 항과 휨모멘트의 영향을 고려할 수 있는 항으로 나뉜다. 이때 비틀림 모멘트와 관련된 항은 음의 부호를 띠고 있는데, 곡률이 커질수록 작용하는 비틀림 모멘트가 증가하므로, 그에 대한 강도 감소분을 효과적으로 고려할 수 있다. 제안식은 유한요소 해석 결과와 매우 잘 일치하며, 선행연구에 비해 그 정확도가 크게 향상되었다.

사실상 곡선 거더는 비틀림 모멘트를 상시 저항해야 하므로 휨 부재보다는 휨-비틀림 부재로써 인식됨이 바람직하다. 본 연구결과는 이러한 측면에서 곡선 부재의 강도를 효율적이고 정확하게 추정할 수 있는 방안을 마련하였으며, 그 식의 형태가 단순하여 실무 적용이 간편할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015R1C1A1A01052250).

참고문헌(References)

- [1] 국토교통부(2016) 도로교설계기준(한계상태설계법): 일반교량편, 국토교통부.
Korea Ministry of Land (2016) Infrastructure and Transport, *Highway Bridge Design Specifications(Limit State Design)*, Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (2014) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [3] Hanshin Expressway Public Coporation, and Steel Structure Study Committee (1988) *Guidelines for the Design of Horizontally Curved Girder Bridges(Draft)*, Hanshin Expressway Public Corporations, Osaka, Japan.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials (2003) *Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges 2003 with Design Examples for I-girder and Box Girder Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- [5] Yuhshi, F. and Nishida, S. (1981) Ultimate Load Behavior of Curved I-Beams. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.107, No.2, pp.367-385.
- [6] Hiroshi, Y. and Kouji, M. (1983) Ultimate Strength Analysis of Curved I-Beams. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.109, No.1, pp.192-214.
- [7] Dabrowski, R. (1968) *Curved Thin-walled Girders*. Cement and Concrete Association, London, England.
- [8] Morris, D.L. (1968) Curved Beam Stiffness coefficients. *Journal of Structural Division*, American Society of Civil Engineering, ASCE, Vol.94, No.5, pp.1165-1174.
- [9] Ho Y.S. (1972) *Analysis and design of curved composite box girder bridges*. Ph.D dissertation, University of Maryland, Maryland.
- [10] Fathalla, M. El-Amin, D., and M. Brotton (1976) Horizontally Curved Beam Finite Element Including Warping. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Wiley, Vol.10, No.6, pp.1397-1403.
- [11] Hsu, Y.T. (1989) *The Development and Behavior of Vlasov Elements for the Modeling of Horizontally Curved Composite Box Girder Bridge Superstructures*, Ph.D Dissertation, University of Maryland.
- [12] Kang, Y.-J. (1992) *Nonlinear Theory of thin-walled curved beams and finite element formulation*, Ph.D dissertation, Auburn University.

- [13] Kang, Y.J. and Chai, H.Y. (1994) Thin-Walled Curved Beams. I: Formulation of Nonlinear Equations, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.120, No.10, pp. 2072-2101.
- [14] Richard Liew, J.Y., Thevendran, V., Shanmugam, N.E., and Tan, L.O. (1995) Behaviour and Design of Horizontally Curved Steel Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.32, No.1, pp.37-67.
- [15] Shanmugam, N.E., Thevendran, V., Richard Liew, J.Y., and Tan, L.O. (1995) Experimental Study on Steel Beams Curved in Plan, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.121, No.2, pp.249-259.
- [16] Pi, Y.-L. and Trahair, N. S. (1997) Nonlinear Elastic Behavior of I-Beams Curved in Plan. *Journal of Structural Engineering*, Vol.123, No.9, pp.1201-1209.
- [17] Pi, Y.-L., Bradford, M.A., and Trahair, N.S. (2000) Inelastic Analysis and Behavior of Steel I-Beams Curved in Plan, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.126, No. 7, pp.772-779.
- [18] Pi, Y.-L. and Bradford, M.A. (2001) Strength Design of Steel I-Section Beams Curved in Plan. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.127, No.6, pp.639-646.
- [19] Nishida, S., Yoshida, H., and Fukumoto, Y. (1978) Large Deflection Analysis of Curved Members with Thin-walled Open Cross-section. *24th Symposium of Structural Engineering*, pp.77-84.
- [20] Yoo, C.H., Kang, Y.J., and Davidson, J.S. (1996) Buckling Analysis of Curved Beams by Finite Element Discretization, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.122, No.8, pp.762-770.
- [21] 이기세, 김승준(2016) 소수주형 수평곡선 강교량 상부구조의 자유진동 특성분석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제5호, pp.365-371.
Lee K.S. and Kim, S.J. (2016) Free-vibration Characteristics of Two-I-girder Steel Bridges Curved in Plan, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.5, pp.365-371 (in Korean).
- [22] 강영종, 최영준(1995) 박판수평곡선보의 자유진동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제7권, 제4호, pp.243-252.
Kang, Y.J. and Choi, Y.J. (1995) Free Vibration of Thin-Walled Horizontally Curved Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.7, No.4, pp. 243-252 (in Korean).
- [23] 윤기용, 강영종(1998) 유한요소법을 이용한 수평곡선 I형 교의 자유진동 해석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제10권, 제1호, pp.47-61.
Yoon, K.Y. and Kang, Y.J. (1998) Free Vibration Analysis of Horizontally I-Grider Bridges using the Finite Element Method, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.10, No.1, pp.47-61 (in Korean).
- [24] 김경식(2010) 휨과 비틀림을 동시에 받는 강/콘크리트 합성 제형 박스거더의 극한강도 상호작용, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제5호, pp.465-475.
Kim, K.S. (2010) Ultimate Strength Interaction of Steel/Concrete Composite Trapezoidal Box Girders Subjected to Concurrent Action of Bending and Torsion, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No. 5, pp.465-475 (in Korean).
- [25] 임정현, 이기세, 김희수, 최준호, 강영종(2015) 편심하중이 작용하는 수평곡선 I형 거더의 휨-비틀림 상호작용, 한국산학기술학회논문지, 한국산학기술학회, 제16권, 제9호, pp.6385-6390.
Lim, J.-H., Lee, K.-S., Kim, H.-S., Choi, J.-H., and Kang, Y.-J. (2015) Interaction of Flexure-Torsional by eccentric Load in Horizontal Curved 'I' Shape Girder, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, KAIS, Vol.16, No.9, pp.6385-6390 (in Korean).
- [26] 김승준, 한택희, 원덕희, 강영종(2013) 파형 복부판이 수평곡선 I형 거더의 극한 거동에 미치는 영향, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제33권, 제4호, pp.1327-1336.
Kim, S.J., Han, T.H., Won, D.H., and Kang, Y.J. (2013) Effects of Corrugated Webs on the Ultimate Behavior of Horizontally Crved I-shaped Girders, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.33, No.4, pp.1327-1336 (in Korean).

요 약 : 수평곡선 구조용 부재는 중력하중 하에서도 휨모멘트와 비틀림 모멘트를 동시에 저항하여야 한다. 이때, 비틀림 모멘트에 의하여 부재 내부의 응력상태는 불균일해지고, 때에 따라 요소의 이른 항복을 야기하여 결과적으로 부재의 극한강도가 저하될 수 있다. 해석에 따르면 곡률 중심각이 45도인 부재는 직선부재에 비해 동일한 조건 하에서 극한 강도가 50% 이상 감소될 수 있다. 그럼에도 불구하고, 현재까지 곡선 거더의 강도 산정 방안에 관한 연구는 미진한 실정이다. 본 연구에서는 휨, 순수비틀림, 뒹 등의 영향을 독립적으로 고려할 수 있는 구조 모델이 선정되었으며 이에 따라 극한강도에 영향을 미치는 인자가 도출 되었다. 곡선 부재의 거동은 횡-비틀림-수직 거동으로 재정의 되었으며, 휨-비틀림 상호작용 곡선을 이용하여 최종적으로 곡률, 비지지길이, 단면 형상등 거동에 영향을 미치는 인자들을 포함하는 극한강도 산정식을 제안하였다.

핵심용어 : 강재, 곡선거더, 비선형, 강도, 비틀림