

## 파형 복부판이 수평 곡선 I형 거더의 극한 거동에 미치는 영향

김승준\* · 한택희\*\* · 원덕희\*\*\* · 강영종\*\*\*\*

Kim, Seungjun\* · Han, Taek Hee\*\* · Won, Deok Hee\*\*\* · Kang, Young Jong\*\*\*\*

### Effects of Corrugated Webs on the Ultimate Behavior of Horizontally Curved I-shaped Girders

#### ABSTRACT

In this study, the effects of corrugated webs on the ultimate behavior of horizontally curved I-shaped girders are investigated. Because of the geometric characteristics of corrugated plates, corrugated webs can be used for enhancing torsional and warping stiffness of plate girders. Many researches have been conducted to study the effects of corrugated webs on the ultimate behavior of straight girders. But, the studies of the ultimate behavior of horizontally curved girders with corrugated webs, which generally show out-of plane behavior manly, have been rarely performed so far. By performing inelastic-nonlinear analysis, the ultimate behavior of curved girders with corrugated webs is studied in this paper. Laterally unsupported length and subtended angle of girders, and length of height of corrugation of webs are considered as the geometric parameters which would be expected to affect the ultimate behavior. By this analytical study with considering the geometric parameters, the changes of ultimate behavior and load carrying capacity of curved girders with corrugated webs are investigated. Also, the effects of corrugated webs on the increase of load carrying capacity for curved girders are studied with comparing to the capacity of general curved girders with flat webs. According to the analytical results, corrugated webs can be used to increase the ultimate load carrying capacity of curved girders, because of their high torsional and warping stiffness. But, it is also indicated that they may decrease the load carrying capacity of curved girders which have relatively small subtended angle or initial curvature, because of an accordion effect.

**Key words** : Corrugated web, Horizontally curved girder, Nonlinear analysis, Inelasticity, Ultimate behavior

#### 초 록

본 논문은 파형 복부판이 수평 곡선 I형 거더의 극한 거동에 미치는 영향을 다룬다. 파형 복부판은 기하학적 특성에 따라 플레이트 거더의 비틀 및 휨 강성 증진을 위해 적용이 가능하다. 그동안 파형 복부판이 일반 직선 거더의 극한 거동에 미치는 영향을 다룬 많은 연구들이 있었으나, 면외 방향 거동이 주요하게 나타나는 곡선 거더의 극한 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이 연구에서는 비탄성-비선형 해석을 통해 파형 복부판 수평 곡선 I형 거더의 극한 거동을 다룬다. 본 해석 연구에서는 파형 복부판을 갖는 곡선 거더의 극한 거동에 영향을 미칠 수 있는 기하학적 인자로서, 곡선 거더의 횡방향 비지지 길이와 사잇각, 복부판의 파고 및 파장이 주요 매개변수로 고려되었다. 본 해석 연구를 통해, 각 매개변수 변화에 따른 극한 거동 및 내하력 변화를 분석하고, 일반 평형 복부판이 적용된 거더의 내하력과 비교하여 파형 복부판이 내하력 증진에 미치는 영향을 도출하였다. 본 해석 결과에 따르면, 높은 비틀 및 휨 강성에 의해 파형 복부판은 곡선 거더의 내하력 증진에 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 곡선 거더의 곡률 또는 사잇각이 작은 경우, 파형 판의 아코디언 효과에 의해 오히려 내하력이 감소될 수 있다는 것 또한 나타났다.

**검색어** : 파형 복부판, 수평 곡선 거더, 비선형 해석, 비탄성, 극한 거동

\* 정희원 · Texas A&M Univ., Postdoctoral Research Associate, Ph.D (rocksmell@gmail.com)

\*\* 한국해양과학기술원 연안개발 에너지연구부 선임연구원, 공학박사 (taekheehan@kiost.ac)

\*\*\* 정희원 · 한국해양과학기술원 연안개발 에너지연구부 연구연수원, 공학박사 (thekeyone@kiost.ac)

\*\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Korea university · yjkang@korea.ac.kr)

Received March 13 2013, Revised May 30 2013, Accepted June 17 2013

## 1. 서론

파형 강판(Corrugated Steel Plate)은 그 기하학적 특성에 따라 일반 판 부재보다 높은 면의 방향 강성을 보인다. 이러한 장점을 활용하기 위해 파형 강판을 복부판으로 갖는 플레이트 거더가 1925년 경 처음 제안되었고 제작 기술의 발달에 힘입어 1960년대 중반 무렵부터 건축물에 적용되기 시작한 이후 지금까지 파형 복부판 플레이트 거더의 제작 및 사용이 꾸준히 증가하고 있다.

파형 복부판을 갖는 I형 거더는 단면 내 복부판의 위치가 부재의 길이 방향에 대해서 계속 변화하고, 이러한 특성에 따라 1차적으로 단면의 압축 방향에 대한 단면 2차 모멘트 값과 전단 중심이 변화하게 된다. 이와 더불어 복부판의 두께 역시 변화하기 때문에 박판으로 이루어진 I형 단면의 비틀 상수 및 뒤틀 상수 역시 변화하는 값이 되고 이는 일반 편평한 판에 비해 모두 큰 값을 보이게 된다. 결론적으로 거더의 면 외 방향에 대한 주요 거동인 A. 압축 방향 휨 거동, B. 비틀 거동, C. 횡-비틀 좌굴 거동 등에 모두 영향을 미치게 되는데 검토되는 각 강성은 파형 복부판에 의해 모두 증가하므로 면 외 방향 강성의 증가를 유도할 수 있다.

몇몇 연구자들에 의해 파형 판이 이용된 플레이트 거더 및 박판 구조물의 휨강도에 대한 연구가 해석 및 실증 실험을 통해 수행되었다. Egaaly 등(1997)은 실험을 통해 파형 복부판을 갖는 거더의 휨강도에 대해 연구하였고, Han 등(2002)은 원형 파형 판의 탄성 전단좌굴 거동에 대해 해석적으로 연구하였으며, Ahn 등(2003)은 등분포 하중을 받는 파형 강관의 탄성 좌굴거동에 대해서 연구하였다.

Sayed-Ahmed(2004)는 유한요소해석을 통해 횡-비틀 좌굴 강도에 대해 연구를 수행하였다. 이 연구에서 그는 기존의 설계식은 실제 부재의 강도와 비교할 때 다소 보수적인 좌굴 하중의 산정을 유도한다고 하였다. Abbas 등(2006, 2007)은 파형 복부판을 갖는 플레이트 거더의 면내방향 휨 거동에 대해 연구하였고, Moon 등(2007)은 제형 파형 복부판을 갖는 I형 플레이트 거더의 횡-비틀 좌굴 거동에 대해 연구하였는데, Moon 등의 연구에서는 단면 상수에 대한 이론적 접근과 함께 유한요소해석을 통한 좌굴안정성 특성이 다루어졌다. Han 등(2007)은 직교 이방성 복합재료를 구성된 파형 관로의 탄성좌굴 특성에 대해 해석적으로 연구하였다. Ji(2011)는 고유치해석에 의한 탄성좌굴해석을 통하여 다양한 기하학적 변수를 고려한 제형 파형 복부판 I형 거더의 탄성좌굴거동에 대해 연구하고, 각 변수의 영향을 분석하였다. 이 연구에서 그는 파형 복부판 I형 거더가 일반 플레이트 거더보다 월등한 좌굴강도를 보인다는 점을 드러냈으며, 좌굴강도를 고려한 최적의 제형 파형 각도를 제시하였다.

Lindner(1990)는 실험을 통해 제형 파형 복부판을 갖는 플레이

트 거더에서의 비틀 상수 및 뒤틀 상수에 대한 연구를 하였는데, 그의 연구에서 비틀 상수의 경우는 일반 플레이트 거더와 동일하다는 결론을 맺었다. 그러나 일반적으로 파형판의 비틀 강성은 일반 판에 비해 커진다는 것은 정성적으로 판단이 가능한 문제이고, 타 연구 및 본 연구에서의 해석 결과에서도 그러한 경향은 명확하게 나타났다. Kim 등(2012)은 유한요소해석 결과를 기초로 하여 Sine 파형 복부판의 기하학적 특성치가 고려된 파형 복부판 I형 거더의 등가 비틀 및 뒤틀 상수식을 제시하였다.

많은 연구들에서 파형 복부판 I형 거더는 일반 I형 거더보다 뚜렷이 큰 면의 방향 강성을 갖는다는 것이 언급되었다. 이는 전적으로 파형 복부판의 기하학적 특성에 따른 것이다. 이러한 기존의 연구 결과에 기초하면 면의 방향 거동이 보다 명확히 나타나는 곡선 거더에 있어서 파형 복부판의 적용은 곡선 거더의 극한 강도 증진에 효과적인 것이라는 예측은 어느 정도 합리적이다. 많은 연구자들에 의해 수평 곡선 거더는 기하학적 특성에 따라 면내 방향 하중이 작용하더라도 강/압축 방향의 휨 거동과 함께 비틀 거동이 함께 작용하는 복잡한 거동 양상을 보인다는 것이 연구되었다(Nakai와 Yoo 1988, Kang 1992, Kang과 Yoo 1994a, b, Kang 등 1996, Yoo 등 1996, Pi와 Bradford 2000). 특히 곡선 거더의 횡방향 비지지 길이와 사잇각, 곡률 등의 기하학적 특성에 따라서 극한 거동을 지배하는 인자가 휨 및 뒤틀 수직응력에 의한 단면의 소성화, 탄성/비탄성 횡-비틀 좌굴, 비틀력에 의한 단면의 소성화 등 매우 다양하게 나타날 수 있는데, 직선 거더에 비해 면의 방향 거동이 극한 거동에 미치는 영향이 매우 크므로 파형 복부판의 영향 역시 크게 나타날 수 있다.

본 연구에서는 곡선 거더의 극한 거동 및 강도 변화에 대한 파형 복부판의 영향성에 대해 해석적으로 분석하였다. 횡방향 비지지 길이와 사잇각이 각기 다른 수평 곡선 거더의 기본 해석 모델에 대해서 파형 복부판의 파고 변화에 따른 파형 복부판 곡선 거더의 극한 거동 변화를 연구하여 곡선 거더의 강도 증진에 대한 파형 복부판의 효용성을 분석하였다.

## 2. 해석 모델 및 해석 방법

곡선 거더의 극한 거동에 대한 파형 복부판의 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 쉘요소를 이용한 비선형 해석을 통해 해석 모델의 극한 거동을 해석하고 파형 복부판의 기하학적 특성에 따른 극한 거동 및 내하력의 변화를 도출하였다. 본 장에서는 해석 모델과 해석 방법에 대해 간략히 소개한다.

Fig. 1은 파형 복부판의 단면도 및 파형을 나타낸다. 파형복부판의 수평 형상은 Sine 함수를 고려하였다. Fig. 2는 곡선 거더의 수평 형상을 보여주는데, 본 그림에서 나타난 바와 같이 힌지-롤러

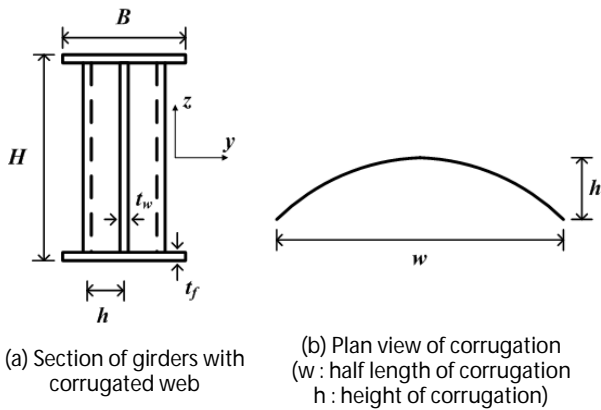


Fig. 1. Section and geometric plan view of corrugated webs (for half cycle)

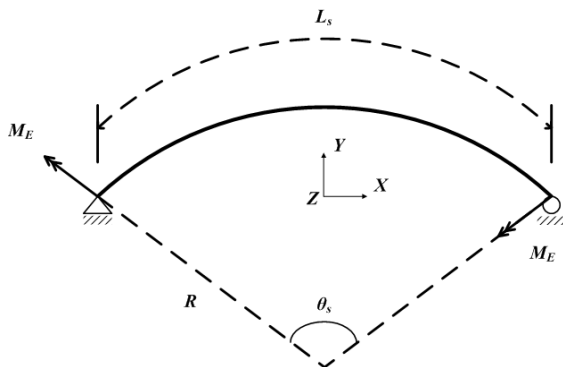


Fig. 2. Plan view of horizontally curved girders(axes of in-plane: X - Y,  $M_E$ : applied external moment along local y axis of the section)

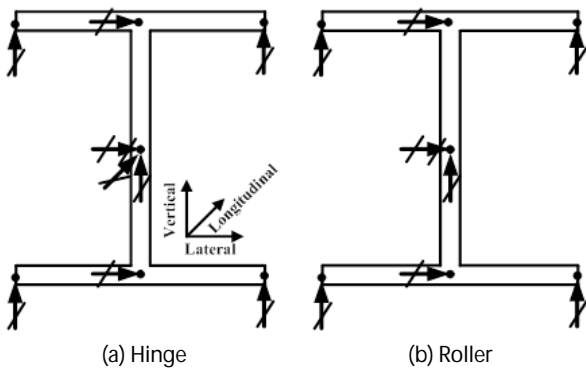


Fig. 3. Considered boundary condition

로 구성된 단순지지조건을 고려하였고(단부에서는 국부좌표계 적용) 주요 하중 형태는 면 내 방향으로 작용하는(단면의 강축 방향) 휨 모멘트를 고려하였다. 이 휨모멘트는 크기가 서로 같고 방향이 반대인 하중 형태로써, 직선 거더에서 순수 휨(Pure bending) 상태를 유도하는 하중 형태와 같다.

Fig. 3은 본 해석 연구에서 고려된 경계 조건을 보다 자세히 나타낸다. 양 단은 기본적으로 힌지-롤러의 단순 지지형태로 고려하였는데, 양 단에서의 비틀 변위는 구속되고 뒹 변위는 자유롭게 하기 위하여 힌지 조건의 경우, 양 플랜지의 끝단과 단면의 도심에서 수직 방향 변위(처짐)를 구속하고 플랜지와 복부판이 만나는 점과 도심에서 횡 방향 변위를 구속하였으며 도심에서만 길이 방향 변위를 구속하였다. 롤러 조건의 경우, 수직 및 수평 방향 변위 구속 조건은 힌지 조건과 동일하고, 길이 방향 구속은 고려하지 않았다.

Fig. 4는 셸 요소로 모델링 된 비지지길이  $L_s$ 가 6.0 m, 사잇각  $\theta_s$ 가 30°이고, 복부판의 파고  $h$ 가 50.0 mm, 반 파장  $w$ 가 300.0 mm( $w/L_s = 0.05$ )인 부재의 유한요소해석 모델을 나타낸다.

Table 1은 부재 단면 및 재료 기본 물성치를 나타낸다. 본 연구에서는 플랜지 및 복부판의 국부 좌굴 등을 배제하기 위해 이를 방지할 수 있는 충분한 두께를 고려하여 단면을 설정하였다.

Table 2는 본 해석 연구에서 적용된 곡선 거더 모델의 횡방향 비지지길이  $L_s$ , 사잇각  $\theta_s$ , 복부판의 반 파장  $w$  그리고 파고

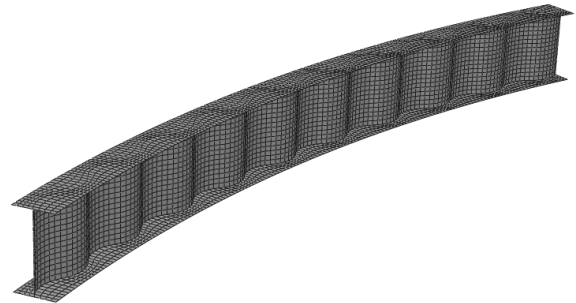


Fig. 4. Finite element model ( $L_s = 6.0$  m,  $\theta_s = 30^\circ$ ,  $w = 300.0$  mm,  $h = 50.0$  mm)

Table 1. Basic geometric and material properties

$B$ (mm)	300.0	
$H$ (mm)	600.0	
$t_f$ (mm)	24.0	
$t_w$ (mm)	13.0	
$E$ (MPa)	$2.1 \times 10^5$	
$f_y$ (MPa)	320.0	
$\nu$	0.3	

Table 2. Considered geometric parameters

Laterally unsupported length ( $L_s$ , m)	Subtended angle ( $\theta_s$ , °)	Half length of corrugation ( $w$ , mm)	Height of corrugation ( $h$ , mm)
3.0	5, 10, 15, 20, 30,	150.0	5.0 ~ 50.0
6.0	45, 60	300.0	10.0 ~ 100.0

$h$ 를 나타낸다. 곡선 거더의 비지지 길이는 AASHTO LRFD에서 제시하는 전단면 소성화/비탄성 횡-비틀 좌굴(Lateral Torsional Buckling, LTB)/탄성 LTB를 구분하는 횡방향 수평 비지지 길이 ( $L_p$  : 2054.4 mm,  $L_r$  : 7714.3 mm) 를 기준으로 하여 재료 및 기하학적 요인이 극한 거동에 복합적으로 영향을 미치는 비탄성 LTB 구간에서 두 길이를 선정하였다. 또한 곡선 거더의 사잇각은 5 ~ 60°로 가정하였다. Fig. 2와 같이 양단에 작용하는 강축방향 휨 모멘트에 의해 곡선 거더에 작용하는 강축방향 휨 모멘트 및 비틀 모멘트는 다음과 같은 식으로 계산이 가능하다(Pi와 Bradford 2000).

$$M(\theta) = \frac{M_E \cos(\theta_s/2 - \theta)}{\cos(\theta_s/2)} \quad (1)$$

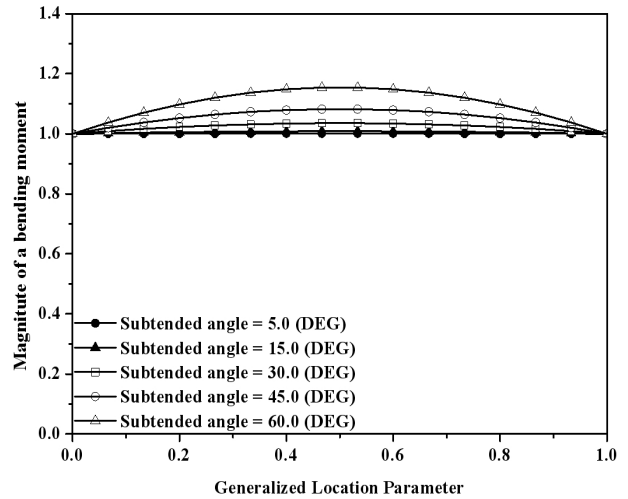
$$T(\theta) = \frac{M_E \sin(\theta_s/2 - \theta)}{\cos(\theta_s/2)} \quad (2)$$

여기서,  $M_E$  : 지점부 작용 강축 방향 휨 모멘트  
 $\theta_s$  : 사잇각,  $\theta$  : 부재 왼쪽 끝단부터의 단면각

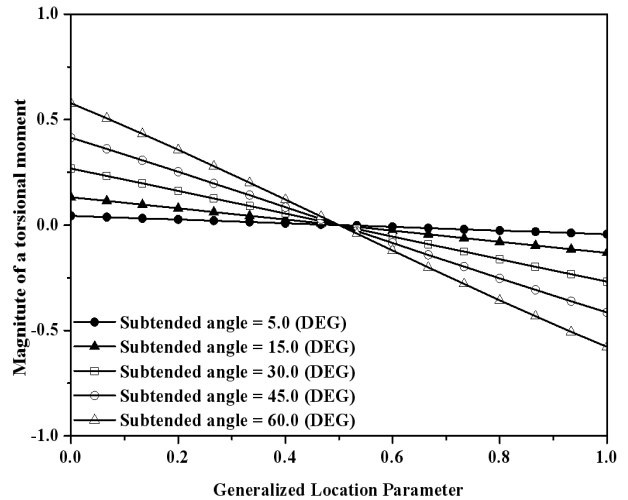
Fig. 5는 위 두 식을 통한 부재에 작용하는 강축방향 휨 모멘트 및 비틀 모멘트의 분포를 나타내는데, 부재의 사잇각이 커짐에 따라 비틀 모멘트의 비율이 점진적으로 증가하여 분포함을 잘 알 수 있다. 이는 곡선 거더의 사잇각의 변화에 따라 극한 거동을 지배하는 인자가 휨 거동에서 비틀 거동으로 변화해가는 것을 유추할 수 있는 근거가 된다.

비지지 길이에 따라 복부판 파장 및 파고를 결정하였는데, 먼저 복부판 반 파장/비지지 길이의 비를 5%로 가정하여 각 모델의 복부판 파장을 선정하였고, 복부판 파형의 파고( $h$ )/반 파장( $w$ )의 비를 1/30~1/3의 범위로 가정하여 해석 모델을 구성하였다.

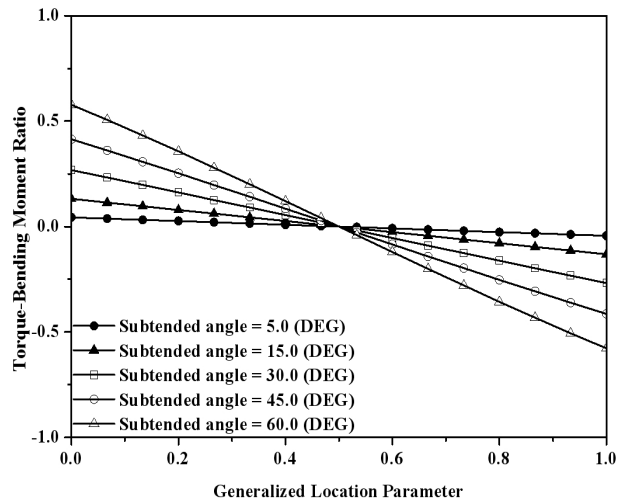
본 연구에서는 구조물의 재료 및 기하학적 비선형성을 모두 고려한 비선형 해석을 통해 파형 복부판을 갖는 곡선 거더의 극한 거동을 분석하였다. 이러한 해석 연구를 위해 ABAQUS V6.10을 이용하였다. 먼저 구조물은 Fig. 4에 잘 나타난 대로 4절점 쉘요소를 통해 모델링(ABAQUS의 S4R 요소) 되었다. 엄밀한 해석을 위해 플랜지의 폭 방향으로 8등분, 복부판의 깊이 방향으로 16등분 그리고 3.0 m 모델의 경우, 길이 방향으로 80등분, 6.0 m 모델의 경우 160등분하여 쉘 요소의 길이비가 1:1에 근접하도록 하였다. 재료 모델의 경우 강재의 완전 탄소성 조건을 적용하였고, 기하학적 비선형성을 반영한 호장법(Arc length method, ABAQUS의 RIKS 옵션 적용)에 의한 증분-반복해석을 통해 비선형 비탄성 해석을 수행하였다.



(a) Bending moment (for strong axis, magnitude :  $M(\theta) / M_E$ )



(b) Torsional moment (magnitude :  $T(\theta) / M_E$ )



(c) Ratio between torsional / strong axis bending moment (ratio :  $T(\theta) / M(\theta)$ )

Fig. 5. Moment distribution induced by applied end moments

### 3. 파형 복부판을 갖는 수평 곡선 I형 거더의 극한 거동 분석

본 장에서는 비선형-비탄성 구조해석을 통한 파형 복부판 수평 곡선 I형 거더의 거동에 대해 분석한다. 횡방향 비지지 길이  $L_s$ , 수평 곡선의 사잇각  $\theta_s$ , 그리고 복부판 파형의 높이  $h$ 를 주요한 매개변수로 고려한 해석 연구를 수행하였다. 해석 결과를 토대로 극한 거동 및 내하력의 변화를 분석하여 파형 복부판이 곡선 거더의 극한 거동 및 내하력 변화에 미치는 영향을 도출하였다.

#### 3.1 파형 복부판에 의한 아코디언 효과

Fig. 6은 비지지길이  $L_s$ 가 3,000 mm인 단순지지 직선 거더에서 복부판의 파고 변화에 따른 단면의 소성모멘트의 변화를 나타낸다. 여기서  $M_{p,flat}$ 은 일반 편평한 복부판을 갖는 해석모델의 소성 모멘트,  $M_{p,flange}$ 는 동일 모델에서 플랜지만 고려한 소성 모멘트, 그리고  $M_{p,cor}$ 는 파형 복부판을 갖는 해석모델의 소성 모멘트를 의미한다. 본 그래프에서 잘 나타난 대로, 파형 복부판의 아코디언 효과에 의해 단면이 받을 수 있는 소성 모멘트는 파고가 커짐에 따라 감소하고 이는 결국 플랜지만 고려한 단면의 소성 모멘트 값에 점차 수렴함을 알 수 있다. 이러한 구조적 거동은 I형 거더의 비틀 및 압축 방향 휨 강성의 증대를 위해 적용한 파형 복부판은 면내 방향 휨 강성 및 강도를 오히려 저하시킬 수 있다는 것을 의미한다. 다시 말해, 파고가 커짐에 따라 예상할 수 있는 면외 방향 강성의 증가와 함께 면내 방향 강성의 감소가 공존하여 파형 복부판의 적용은 면내방향 거동이 극한거동을 지배하는 경우에 있어서는 오히려 플레이트 거더의 내하력을 저하시킬 수도 있다는 것을 의미한다.

#### 3.2 파형 복부판 수평 곡선 I형 거더의 비선형-비탄성 반응

Fig. 7과 Fig. 8은 양 지점에서 강축방향으로 작용하는 끝단 휨모멘트  $M_E$ 에 의한 극한 상태에서의 응력 분포(Von-Mises

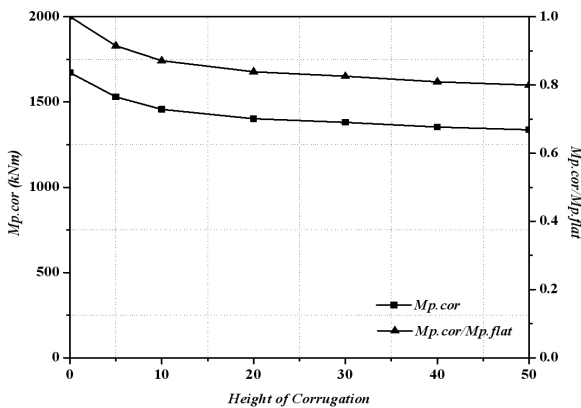


Fig. 6. Change of plastic moment of general straight girders induced by corrugated webs ( $M_{p,flat} = 1,672.15 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,  $M_{p,flange} = 1,327.10 \text{ kN}\cdot\text{m}$ )

stress)를 보여준다. 먼저, 사잇각이 비교적 작은( $5^\circ$ ) 모델에서는 플랜지의 항복이 주로 극한 상태를 지배하는 것으로 나타난다. 이 때 플랜지의 항복을 유발하는 응력 성분은 휨모멘트에 의한 수직 응력과 비틀 거동 시 나타나는 뒹 수직 응력이다. 이러한 거동은 Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)에서 잘 나타나는데, 상/하부 플랜지 모두 곡선의 내측부에서 휨 및 뒹에 의한 수직 응력에 의해 주로 항복이 일어나는 것이 확인된다. 이 후 사잇각이 증가하면서 항복이 일어나는 부위는 양 지점의 복부판까지 확대되는 양상을 보인다.

이것은 앞선 Fig. 5에서 잘 나타난 대로, 곡률이 증가할수록 비틀 모멘트가 증가한 데서 비롯된다. 비틀 모멘트에 의한 양 지점부 근 복부판에서의 전단응력 증가에 따라 결국 플랜지와 함께 복부판 역시 항복하는 극한거동으로 변화하게 된다.

동일한 사잇각 및 곡률을 갖을 때 파고의 차이는 1차적으로 복부판의 응력분포의 차이를 가져온다. 본 해석 예제들에서 복부판의 응력 분포에 주로 영향을 미치는 인자는 비틀 모멘트라고 볼 수 있는데, 파고 증가에 의해 비틀 강성이 증가하여 복부판에 작용하는 응력이 저감됨을 확인할 수 있다. 이러한 효과는 특히 비교 대상 중 곡률이 가장 큰 경우인 Fig. 7(e)와 (f)의 비교에서 잘

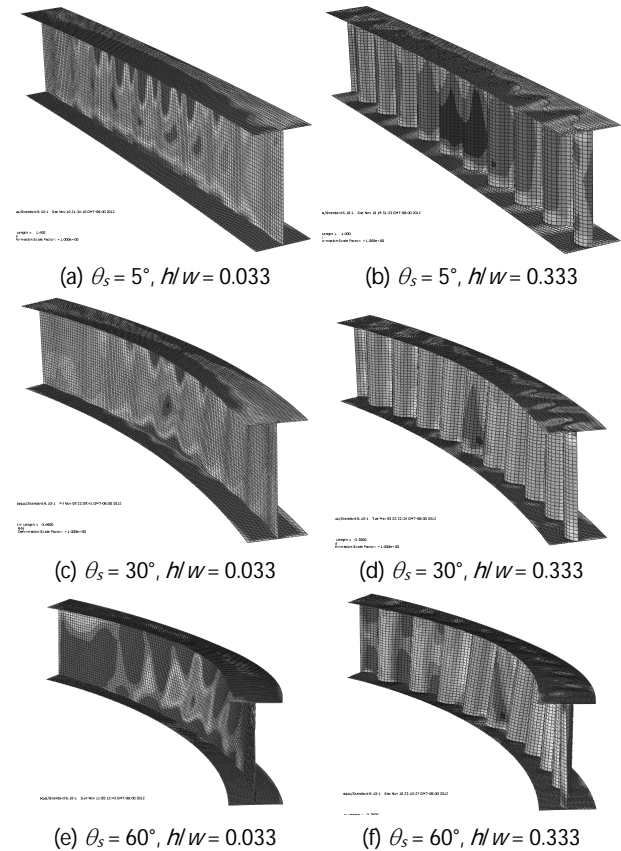


Fig. 7. Stress distribution at the ultimate state ( $L_s = 3.0 \text{ m}$ ,  $w/L_s = 0.05$ , Von-Mises stress, RED: 320.0 MPa, BLUE: 0.0 MPa)

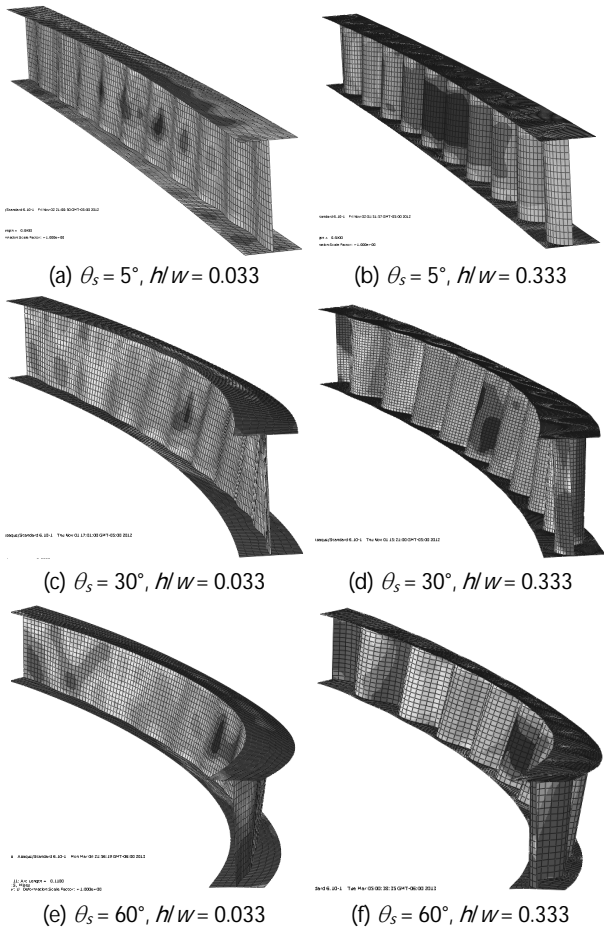
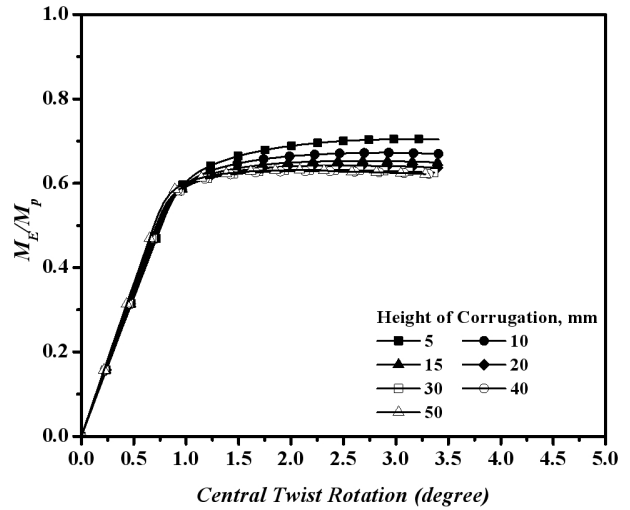


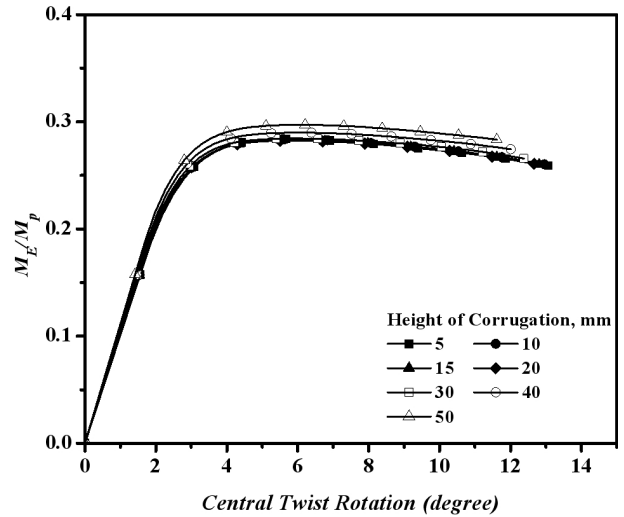
Fig. 8. Stress distribution at the ultimate state ( $L_s = 6.0\text{ m}$ ,  $w/L_s = 0.05$ , Von-Mises stress, RED: 320.0 MPa, BLUE: 0.0 MPa)

나타나는데, 파고 증가에 의해 복부판에 작용하는 응력이 크게 감소함을 알 수 있다. 여기에 더하여 파고 증가에 의한 면의 방향 강성의 증가는 결과적으로 뒎 응력 감소에 영향을 미치게 된다. 따라서 파고의 증가는 플랜지에 발생하는 뒎 응력 및 복부판에 작용하는 비틀 전단 응력의 감소를 유도하여 내하력을 증가시킬 수 있다.

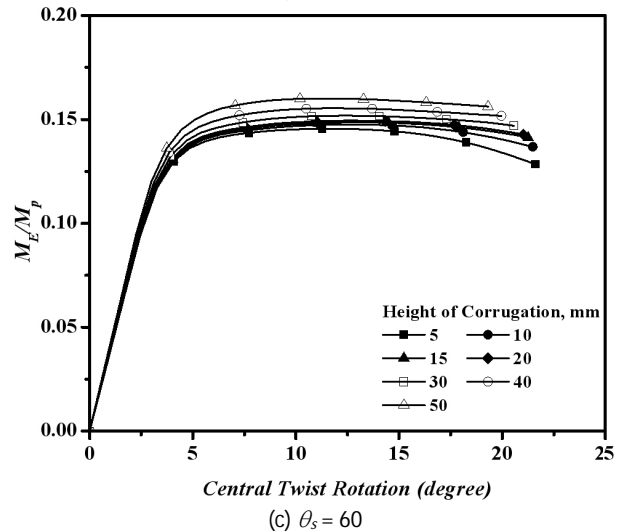
Fig. 9와 Fig. 10은 비선형 해석 후 얻은 하중-변위 곡선의 하나로써, 끝단 모멘트  $M_E$ 와 부재의 중앙부 단면에서의 비틀각 변위  $\phi_c$  간의 관계를 보여준다. 먼저, Fig. 10에서 명확히 나타난 대로, 동일한 비지지 길이와 곡률을 갖을 때, 파고의 증가는 비틀 강성의 증가를 유도한다는 것이 본 그래프의 기울기 변화를 통해 잘 나타난다. 이와 비교해서, Fig. 9에 나타난 비지지 길이  $L_s = 3.0\text{ m}$  모델의 해석 결과의 경우, 파고 증가에 의한 비틀 강성 증가 효과는 상대적으로 크지 않았으나, 초기 기울기의 증가 효과는  $L_s = 6.0\text{ m}$  모델의 경우와 마찬가지로 나타났다. 구조물의 극한 상태를 의미하는 극한점의 경우, Fig. 10에서는 전반적으로 파고의



(a)  $\theta_s = 5$

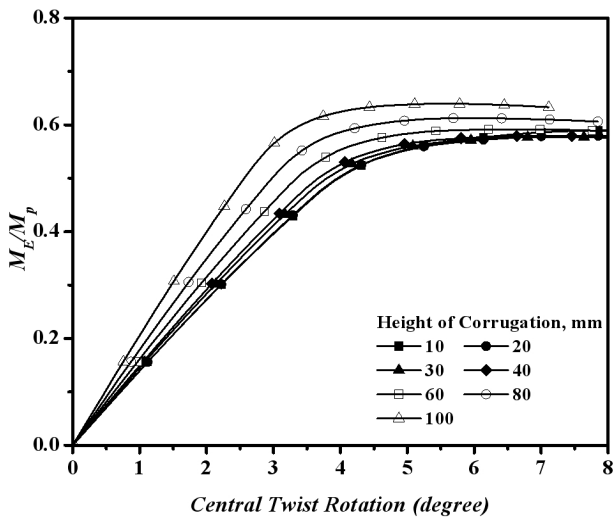


(b)  $\theta_s = 30$

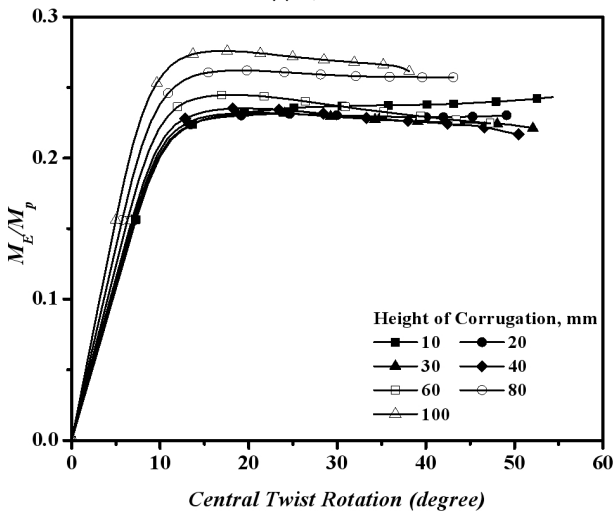


(c)  $\theta_s = 60$

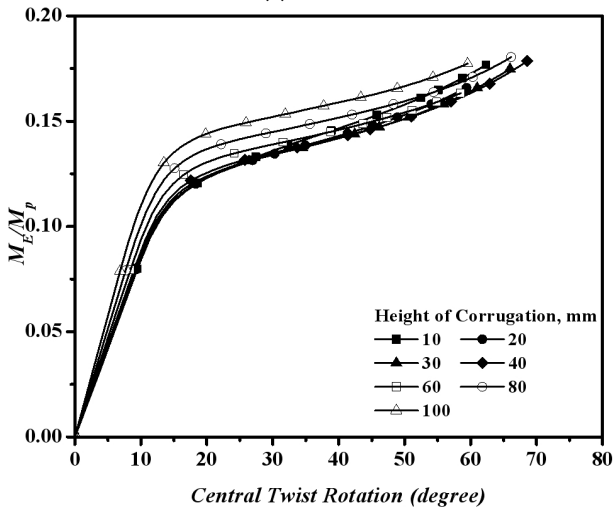
Fig. 9.  $M_E - \phi_c$  curves ( $L_s = 3.0\text{ m}$ ,  $\phi_c$ : torsional displacement at a center section)



(a)  $\theta_s = 5$



(b)  $\theta_s = 30$



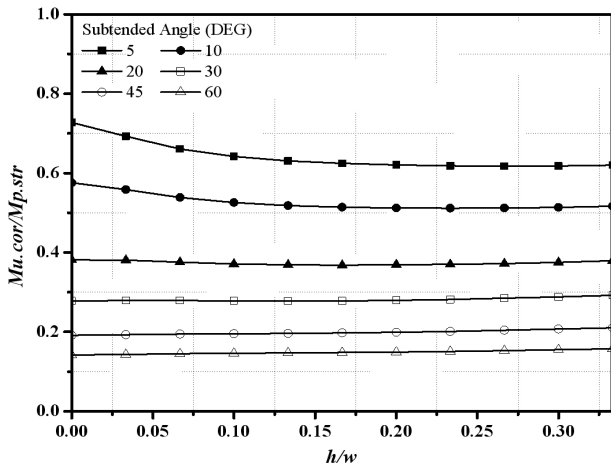
(c)  $\theta_s = 60$

Fig. 10.  $M_E - \phi_c$  curves ( $L_s = 6.0$  m,  $\phi_c$ : torsional displacement at a center section)

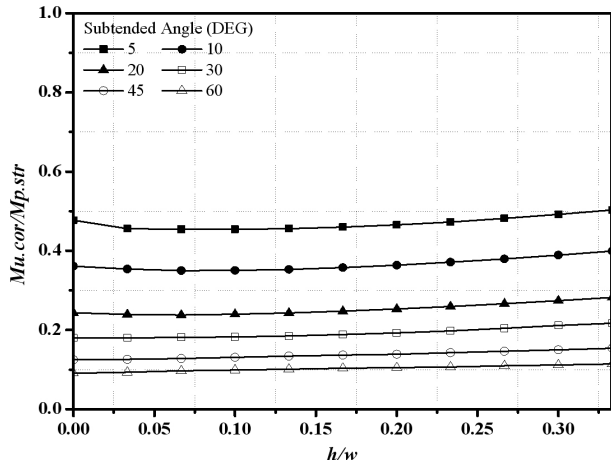
증가와 함께 증가하는 경향이 명확히 나타난다. 그런데, Fig. 9(a)의 경우, 파고가 증가함에 따라 오히려 극한점이 낮아지는 경향이 극명하게 나타나는데, 이는 앞서 간략히 검토한 아코디언 효과에 따른 것으로 분석된다. 면내방향 휨 거동이 극한거동을 지배하는 경우, 파형 판에 의한 아코디언 효과로 인해 파고의 증가에 의한 면내 방향 휨 강도의 감소효과가 극한 하중에 더욱 영향을 미치는 데에서 이러한 경향이 나타나게 된다. 이러한 거동을 다시 정리하면, 파고의 증가는 면외 방향 강성의 증가효과와 함께 아코디언 효과의 증가 역시 유발한다. 만약, 극한거동을 지배하는 인자가 주로 면내방향 휨 거동이라면 파고의 증가는 오히려 극한 강도를 저하시킬 수 있다는 것을 의미한다. 반대로 면내방향 휨 거동 뿐 만 아니라 비틀 및 탄성비탄성 LTB 등의 면외 방향 거동 역시 극한 거동에 큰 영향을 미치는 경우, 파고의 증가에 의한 면외 방향 강도 증진 효과가 극한 강도 증진에 더욱 영향을 미치게 된다.

Fig. 11은 비선형 해석을 통해 얻은 무치원화 된 파형 복부관 거더의 극한 모멘트 강도  $M_{u,cor}/M_{p,str}$ 를 부재의 비지지길이, 사잇 각 그리고 파고( $h$ )-파장( $w$ ) 비율에 대하여 구분하여 표현하고 있다 ( $M_{u,cor}$ : 파형 복부관 거더의 극한 단부 모멘트,  $M_{p,str}$ : 동일 비지지 길이를 갖는 직선 거더 단면의 소성 모멘트). Fig. 11에서 잘 나타난 대로 곡선 휨 부재의 구조 거동 특성에 따라 비지지 길이가 길어지고 사잇각이 커질수록 휨강도는 현저히 저하되는 것을 잘 알 수 있다. 복부관 파형의 파고가 커짐에 따른 극한 모멘트 변화를 보면, 파고의 증가에 따른 극한 강도의 점진적인 증가가 일반적으로 나타났다. 정성적으로 보면, 파고 증가에 의한 강도 증가 효과는, 곡률이 커서 면외 방향 거동이 지배적인 경우에 기대할 수 있다. 곡선 거더의 기하학적 특성에 따라, 곡률이 커짐에 따라 전반적인 모멘트 강도는 급격히 저하되어 곡률이 적은 모델과 비교할 때 매우 작은 값으로 나타난다. 따라서 파고 증가에 의한 모멘트 강도 증가효과가 발휘되더라도 본 Fig. 11과 같은 스케일에서는 두드러지게 나타나지 않는다. 이러한 모멘트 강도 증가효과는 다음 Fig. 12에서 동일 횡방향 비지지 길이와 사잇각을 갖을 때, 일반 복부관을 갖는 곡선 거더의 모멘트 강도와와의 비교를 통하여 파고 증가에 의한 내하력 증가 효과를 좀 더 명확히 확인 할 수 있다.

이러한 거동 이면에, 사잇각이 매우 작은 경우는 오히려 파고가 커짐에 따라 극한 모멘트가 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타난다. Fig. 11(a)에서  $\theta$ 가  $30^\circ$  이하인 경우와 (b)에서  $\theta$ 가  $20^\circ$  이하인 경우 파고 증가에 의해 오히려 면내 휨에 대한 내하력이 감소하는 구간이 존재한다. 이는 파고 증가에 의한 면외 방향 강성 증가 효과 이면에 존재하는 파형판 사용에 따른 아코디언 효과가 상충하여 나타나는 현상으로써, 이것은 Fig. 12와 함께 다음 문단에서 더 자세히 기술하였다.

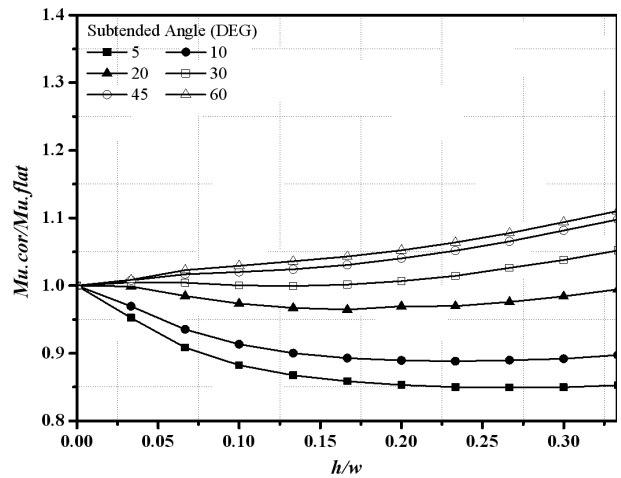


(a)  $L_s = 3.0\text{ m}$ ,  $w/L_s = 0.15$

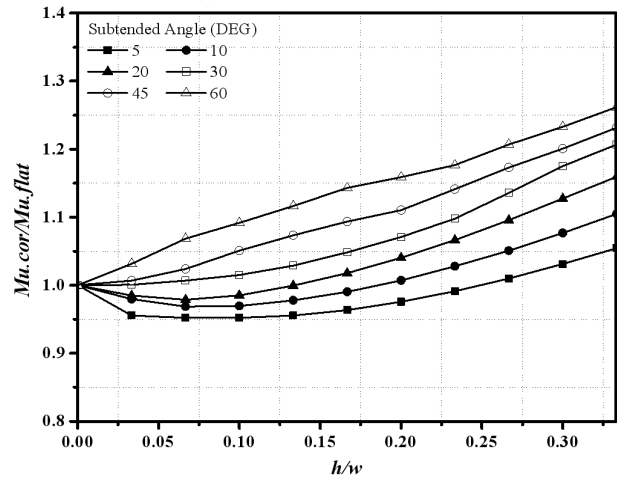


(a)  $L_s = 6.0\text{ m}$ ,  $w/L_s = 0.15$

Fig. 11. Corrugate height-length ratio vs ultimate moment ( $M_{u.cor}$ : ultimate moment for applied external moment  $M_E$ ,  $M_{p.str}$ : sectional plastic moment for straight girders with a flat web)



(a)  $L_s = 3.0\text{ m}$ ,  $w/L_s = 0.15$



(a)  $L_s = 6.0\text{ m}$ ,  $w/L_s = 0.15$

Fig. 12. Corrugate height-length ratio vs  $M_{u.cor} - M_{u.flat}$  ratio ( $M_{u.flat}$ : ultimate moment of curved girders with flat webs)

Fig. 12는 복부판 파형의 파고 변화에 따른 극한 모멘트 변화를 일반 복부판을 갖는 동일 제원 상의 곡선거더의 극한 모멘트 값에 대한 비율로써 나타낸다. 비지지 길이가 각각 다른 두 해석 모델 그룹에서 먼저 두드러지는 현상은, 사잇각이 상대적으로 작은 경우 (3.0 m 모델의 경우  $30^\circ$  이하, 6.0 m 모델의 경우  $20^\circ$  이하), 파고가 커짐에 따라 오히려 극한 강도가 저하되는 구간의 존재이다. 이러한 현상은 앞선 하중-변위 곡선 및 파고 변화에 따른 극한 모멘트 변화 그래프의 검토에서도 나타나듯이, 파형 복부판 적용에 의한 아코디언 효과에서 비롯된다. 곡률이 상대적으로 작아 면내 휨 거동이 극한 거동에 보다 지배적일 때, 파고 증가에 의한 면외 방향 강성 증가 효과보다 아코디언 효과 증가에 의한 면내 강성 감소 효과가 더 크게 작용하여 결과적으로 파고가 증가함에도 오히려 극한 강도는 저하되는 현상이 나타난다. 그러나  $L_s = 6.0\text{ m}$  모델 그룹에서 잘 나타난 대로, 파고가 지속적으로 증가하게 되면

면외 방향 강성 증가 효과가 아코디언 효과에 의한 면내 방향 강성 감소 효과를 상쇄, 결국 극한하중은 다시 증가하게 된다. 곡률이 상대적으로 큰 경우, 파고의 증가는 극한 강도 증가에 직결되는 모습이 나타났다. 이는 파형 복부판의 높은 비틀 및 뒹 강성에 따른 것으로, 면외 방향 거동에 취약한 곡선 거더에서 파형 판의 적절한 사용은 구조물의 내하력을 증진시킬 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 13은 본 해석에서 고려한 최대 파고를 갖는 파형 복부판이 적용되었을 때 일반 복부판을 갖는 곡선 거더 대비 극한 모멘트의 증감률을 표현하고 있다. 먼저 사잇각이 커짐에 따라 모멘트 증가율 역시 증가하는 것을 알 수 있다(동일 파고의 파형 복부판 적용 시). 이를 다시 말하면, 면외 방향 거동의 영향성이 큰 경우, 파형 판의 구조적 장점이 보다 두드러지게 활용됨을 의미한다. 본 해석 연구에서는 비지지 길이와 파형 복부판의 파장파고 간의 비율을



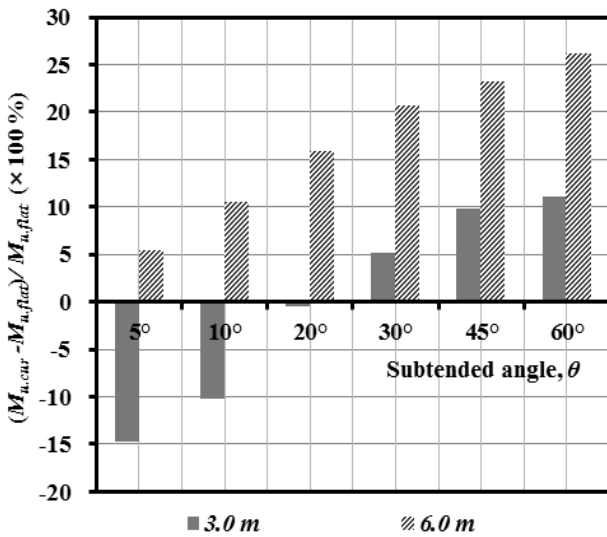


Fig. 13. Change of moment carrying capacity induced by corrugated webs ( $w/L_s = 0.05$ ,  $h/w = 0.333$ ), comparing to the capacity of curved girders with flat webs

고정 값으로 하여 매개변수를 구성하였고, 이로 인해 사실상 3.0 m 모델의 경우 최대 50.0 mm의 파고가 고려되었다(6.0 m 모델의 경우 100.0 mm 고려). 따라서 3.0 m 모델에 6.0 m 모델의 복부판과 동일한 크기의 파고를 갖는 파형 복부판이 적용될 경우, 이에 따른 극한 모멘트 증가율 역시 더욱 증가하여 6.0 m 모델과의 증가율 차이는 Fig. 13의 값보다 현격히 줄어들어 파형 판 적용에 따른 모멘트 강도 증가 효과가 6.0 m 모델의 경우와 같이 더욱 두드러지게 나타날 것은 쉽게 예측이 가능하다.

이와 반대로, 면내방향 거동이 지배적일 때는 파형 판의 사용은 오히려 휨에 대한 내하력을 저하시킬 수 있음을 또한 의미한다. 본 논문에서 언급된 대로, 파고의 증가에 의한 아코디언효과 증가는 복부판이 휨에 대한 저항성을 크게 저하시키기 때문에 결과적으로 극히 작은 곡률을 갖는 곡선 거더에 있어서 파형 판의 적용은 휨 내하력 증진에 큰 도움이 되지 않는다는 것이 본 해석 연구 결과 드러났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 파형 복부판이 수평 곡선 I형 거더의 극한 거동에 대한 영향을 해석적으로 분석하였다. 곡선 거더의 수평 비지지길이와 사잇각 그리고 복부판 파형의 파고를 주요 변수로 한 매개변수 해석 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 아코디언 효과에 의한 파형 복부판 거더의 휨강도 저하 현상을 간략히 분석하기 위해, 파형 복부판을 갖는 직선 거더에서 아코디언 효과에 의한 단면의 소성 모멘트 저하 효과를 간략히

검토했는데, 검토 결과, 적용된 파형 복부판의 파고가 커질수록 소성 모멘트가 저하되어 단면의 플랜지만 고려하여 계산된 소성 모멘트에 수렴하는 양상을 보였다.

- (2) 비지지 길이가 짧고 곡률이 작아 직선 거더에 가까운 경우, 파형 복부판의 아코디언 효과에 의해 오히려 일반 복부판이 적용된 플레이트 거더에 비해 휨강도가 저하되는 거동을 보였다. 특히 이러한 현상은 면내 방향 거동이 극한 거동을 지배하는 경우 더욱 두드러지게 나타나는데, 본 연구에서 도출된 해석 결과에서  $L_s = 3.0m$ 이고  $\theta_s = 5^\circ$  인 경우, 파형 복부판의 적용에 따라 일반 복부판을 적용한 곡선 거더의 극한 모멘트와 비교하여 최대 약 15%의 감소율을 보였다.
- (3) 그러나 비지지 길이가 짧지 않고 곡률 역시 일정 수준 이상인 곡선 플레이트 거더의 경우, 파형 복부판은 구조물의 휨강도 증가에 큰 도움이 될 수 있다. 특히, 곡선 거더의 극한 거동이 비틀 모멘트에 의한 지점부 부근에서의 재료적 항복이나 탄성/비탄성 LTB 등의 3차원 거동에 의해 지배될 때, 파형 복부판의 높은 비틀 및 뒤 강성에 의해 내하력이 증가하게 된다.
- (4) 본 해석 연구에서 고려한 단면에 대해,  $L_s = 3.0m$ 의 모델(직선 거더의 경우 비탄성 LTB 지배 구간의 비지지 길이)의 경우  $\theta_s$ 가  $30^\circ$  이상,  $L_s = 6.0m$ 의 모델(직선 거더의 경우 탄성 LTB 지배 구간의 비지지 길이)의 경우  $\theta_s$ 가  $20^\circ$  이상인 경우, 파형 복부판의 적용은 아코디언 효과를 상쇄하고 직접적인 극한 모멘트 증가를 유도한다.
- (5) 본 해석 연구결과, 동일한 비지지길이 및 복부판의 파고를 갖을 때, 곡률 또는 사잇각이 증가할수록 파형 복부판에 의한 내하력 증가 효과가 크게 나타났고, 검토한 모델에서 최대 26.2%의 극한 단부 모멘트 증가율을 보였다( $L_s = 6.0m$ ,  $w/L_s = 0.15$ ,  $h/w = 0.333$ 일 때).

본 해석 연구에서는 단부에 작용하는 휨모멘트에 의한 거동을 주로 다루었다. 파형 복부판 I형 거더의 실제적이고 보다 실용적인 적용을 위해서는, 본 해석 연구에서 분석된 파형 복부판 I형 곡선 거더의 극한 거동의 개념을 바탕으로, 보다 다양한 횡방향 비지지 길이와 복부판 파형의 파장 및 파고 그리고 적용 하중 형태를 고려한 해석 연구가 수행되고, 이를 통해 최적의 파형의 결정 및 내하력 예측식의 개발 연구가 추가적으로 실행되어야 할 것이라고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 12 기술혁신B01)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Ahn, W. C., Han, T. H., Lim, N. H. and Kang, Y. J. (2003). "Buckling behavior of corrugated steel pipe under external uniform pressure." *Journal of Korean Society of Steel Structures*, Vol. 15, No. 1, pp. 33-40 (in Korean).
- Han, T. H., Kim, T. Y., Han, K. H. and Kang, Y. J. (2007). "Elastic buckling characteristics of corrugated pipe made of orthotropic composite material." *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 11, No. 2, pp. 77-84 (in Korean).
- Han, T. H., Lim, N. H., Park, N. H. and Kang, Y. J. (2002). "Elastic shear buckling characteristics of circularly corrugated plates." *Journal of Korean Society of Steel Structures*, Vol. 14, No. 4, pp. 529-538 (in Korean).
- Ji, H. S. (2011). "Buckling behaviors of plate girder with corrugated steel web." *Journal of Korean Society of Steel Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 221-228 (in Korean).
- Moon, J. H., Yi, J. W., Choi, B. H. and Lee, H. E. (2007). "Evaluation of lateral-torsional buckling strength of I-girder with corrugated web under uniform bending." *Journal of Korean Society of Steel Structures*, Vol. 19, No. 5, pp. 463-472 (in Korean).
- Kim, S., Jeon, J. S., Won, D. H. and Kang, Y. J. (2012). "Torsional and warping constants of I-shaped plate girders with a sine corrugated web." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 6, pp. 347-354 (in Korean).
- ABAQUS (2010). *Abaqus analysis user's manual version 6.10*, Dassault Systemes Simulia Corp.
- Abbas, H. H., Sause, R. and Driver, R. G. (2006). "Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loading." *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 132, No. 8, pp. 806-814.
- Abbas, H. H., Sause, R. and Driver, R. G. (2007). "Analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane loads." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 133, No. 3, pp. 347-355.
- Elgaaly, M., Seshadri, A. and Hamilton, R. W. (1997). "Bending strength of steel beams with corrugated webs." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 6, pp. 772-782.
- Kang, Y. J. (1992). *Nonlinear theory of thin walled curved beams and finite element formulation*, PhD Dissertation, Auburn University, Auburn, AL, USA.
- Kang, Y. J., Sung, I. H., Lee, S. S. and Gil, H. B. (1996). "Lateral buckling strength of horizontally curved I-girder." *Proceedings of 4<sup>th</sup> Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges*, Osaka, Japan, pp. 387-395.
- Kang, Y. J. and Yoo, C. H. (1994a). "Thin-walled curved beams. I: Formulation of nonlinear equations." *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 120, No. 10, pp. 2072-2101.
- Kang, Y. J. and Yoo, C. H. (1994b). "Thin-walled curved beams. II: Analytical solutions for buckling of arches." *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 120, No. 10, pp. 2102-2125.
- Lindner, J. (1990). "Lateral torsional buckling of beams with trapezoidally corrugated webs." *Stability of Steel Structures*, Budapest, Hungary, pp. 305-310.
- Nakai, H. and Yoo, C. H. (1988). *Analysis and design of curved steel bridges*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Pi, Y. L. and Bradford, M. A. (2000). "Inelastic analysis and behavior of steel I-beams curved in plan." *Journal of Structural Engineering Division, ASCE*, Vol. 126, No. 7, pp. 772-779.
- Sayed-Ahmed, E. Y. (2004). "Lateral torsion-flexure buckling of corrugated web steel girders." *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, 158(1), pp. 53-69.
- Yoo, C. H., Kang, Y. J. and Davidson, J. S. (1996). "Buckling analysis of curved beams by finite element discretization." *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 122, No. 8, pp. 762-770.