

# 탄성받침을 가지는 단경간 곡선 강박스거더 교량의 부반력 특성평가

김 경 식<sup>1\*</sup> · 이 희 정<sup>1</sup>

<sup>1</sup>충주대학교 토목공학과

## Evaluation of Characteristics on Negative Reactions of Simply Supported Curved Box Girder Bridges with Elastomeric Bearings

Kyungsik Kim<sup>1\*</sup> and Heejeong Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Cheongju Univ., Cheongju, 360-764, Korea

### Abstract

Horizontally curved bridges are subjected to torsional loads by their vertical dead loads only as well as eccentric loads, which cause negative reactions at supports. In this paper, effects of bridge curvature on vertical reactions at supports are investigated for 48.8 m length simple span steel box girder bridges with elastomeric bearings by varying curvature angle from 0.49 to 1.35 rad. In order to expect magnitude and direction of reactions including possibility of negative reactions, reaction evaluation equations have been analytically developed by separating a superstructure of curved bridge into independent components. Concrete slabs and bottom flanges in steel box section are assumed geometrical annular sectors in area dimension, and top flanges and webs that have very narrow projected areas are assumed geometrical arcs in line dimension. Proposed equations have relatively simple forms and prediction values are on very good agreement with those from finite element analyses by difference of 1% order.

**Keywords** : curved bridge, torsional load, simple span, negative reaction, reaction equation, annular sector

### 1. 서 론

도로의 평면적인 제한을 극복하고 공간적 효율을 높이기 위해 곡선 교량의 사용은 지속적으로 증가되고 있다. 곡선 교량은 상부 거더의 단면 형상에 따라 판형거더와 같은 개단면(open section)과 박스거더와 같은 폐단면(closed section)으로 구분할 수 있다. 폐단면으로 이루어진 박스거더로 구성된 곡선교량의 경우 거더 자체가 갖는 휨강성 뿐만 아니라 비틀림강성이 월등히 크기 때문에 곡선교량에 널리 사용되고 있다. 특히 곡률의 정도가 상대적으로 심한 JC교나 IC교에서는 I형 거더교보다 강박스 거더교가 대부분을 차지하고 있다. 미국의 경우 건설되는 강교량의 3분의 1정도가 곡선교량으로 건설된다는 통계가 있다(Kim, 2004).

세계적으로 1960년대까지만 하더라도 곡선교량 건설은 두 지지점 사이에 단순 직선거더를 거치하고 바닥판을 곡선으

로 처리하여 곡선 선형을 이루는 방법이 사용되어져 왔다(Simpson, 2000). 이러한 방법은 Fig. 1에 보인 바와 같이 곡률 외측 바닥판의 캔틸레버 부분( $l_c$ )의 길이가 과도해지는 경향이 있어 이를 극복하기 위해 교각을 촘촘히 건설해야 했고, 결과적으로 공사비가 증가하는 단점을 내포하고 있다. 반면, 곡선거더를 사용한 곡선교량의 경우 이러한 한계를 극복할 수 있을 뿐만 아니라 연속교로도 설계할 수 있다는 장

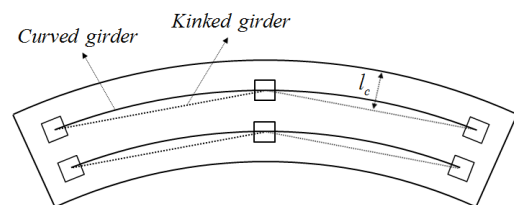


Fig. 1 Kinked girders and curved girders in horizontally curved bridges

\* Corresponding author:

Tel: +82-43-229-8472; E-mail: kkim@cju.ac.kr  
Received December 14 2014; Revised December 25 2014  
Accepted December 26 2014

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

점이 있다. 그러나 곡선교량은 구조적 특성으로 활하중의 편심재하뿐만 아니라 상부구조의 고정하중만으로도 거더 단면이 큰 비틀림을 받을 수 있고, 이로 인해 부반력(negative reactions)이 발생될 수 있으므로 항상 높은 수준의 주의가 요구된다. 부반력은 단순지지 곡선교량에서 전도사고의 주요 원인이 된다.

곡선교에 대한 고전적 연구는 1960년대 Vlasov(1961)의 이론적 고찰이 대표적이며, 이후 비선형 거동을 포함한 비선형 해석 및 수치적 기법에 근거한 많은 연구가 발표되었다. Shimizu와 Yoshida(1991)는 곡선 박스거더교의 중간에 지지된 지점부의 다이아프램 설계를 위해 유한대판법(finite strip method)을 사용하여 2경간 연속교의 반력특성을 분석하였다. Samaan 등(2001)은 단일셀(single-cell), 멀티셀(multi-cell), 다중거더(multiple-girder)의 세 가지 단면 형식을 가지는 곡선 박스거더 교량에서 지점 반력특성을 비교 연구하였다. Lee 등(2002)은 곡선교의 시공 중 위험성을 언급하며, 지점 반력뿐만 아니라 응력과 처짐에 초점을 두어 유한요소법을 통한 매개변수연구를 수행했다. Gupta와 Misra(2007)은 T형 거더를 가지는 사교(skewed bridge)를 대상으로 격자해석(grillage analogy method)을 수행하여 사각과 지간 길이에 따른 부반력 발생 특성을 분석하였고, 지간 길이에 따라 부반력이 발생하는 사각범위를 제시하였다. 국내 연구에서는 Kim 등(2004)이 곡선교 받침배치형태에 따른 주행차량하중에 의한 수평반력 특성을 분석했으며, 동적해석 결과 받침이 거더 외측에 배치된 경우가 중앙에 배치된 경우보다 구조적으로 더 유리하다고 언급했다. Park 등(2007)은 램프교에 적용되는 곡률 반경 55m인 5경간 연속 PSC 박스 거더 곡선교의 부반력 발생 진단 사례를 소개하였으며 곡선교 설계시 부반력 제어의 필요성을 강조했다. Park(2008)는 곡선교량의 단면 내 비틀림으로 인한 안정상의 문제점을 해소하기 위해 곡선교량에서의 부반력 발생 영역을 찾고자, 서로 다른 단면 형태를 갖는 다수의 단경간 곡선 콘크리트 박스 거더 교량을 대상으로 부반력이 발생하지 않는 기하학적 매개변수의 범위를 검토하였다. Kim(2010)은 단경간 곡선 강박스 거더교에서 공용단계와 가설단계에서 발생하는 부반력을 조사하고, 각각의 단계에서 발생하는 부반력을 제어하기 위한 방법을 제안하였다. Park와 Lee(2012)는 곡선교의 부반력 특성을 규명하기 위해 교량의 곡률 반경, 받침의 횡방향 지지거리, 받침부의 사각 등을 매개변수로 하여 부반력 특성을 비교·검토하였다.

대표적인 교량설계기준인 AASHTO LRFD(2012)와 Guide Specification(2004)에서는 교량설계시 곡률효과는 반드시 고려되어야 한다고 규정하고 있다. 일반적으로 단경간 곡선

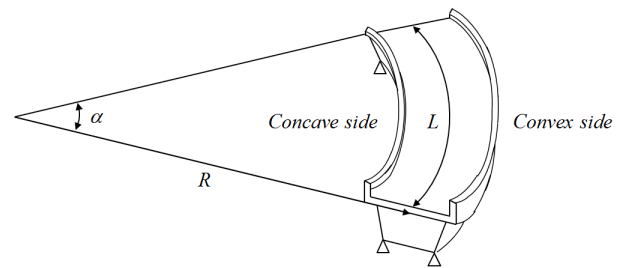


Fig. 2 Typical simple-span single-box girder bridge and notation

교량은 연속경간 곡선교량에 비해 구조적으로 불안정한 구조로서 곡률반경 및 경간 길이 등의 기하학적인 설계 요소에 따라 상대적으로 더 큰 부반력이 발생한다. 본 연구에서는 단경간 곡선 강박스 거더교량을 대상으로 교좌장치 형식 및 배치방식에 따른 수직 및 수평반력 특성을 분석한 후, 곡률 효과에 따른 지점 부반력 크기를 예측하는 산정식을 개발한다. 거더 및 바닥판을 포함하는 상부구조의 자중 및 편심하중을 고려하여 해석적 기법으로 반력 산정식을 제안하고 예제를 통해 유한요소해석 결과와 비교·검토한다. 연구대상으로 한 단경간 곡선 강박스거더의 대표형상 및 대표 변수를 Fig. 2에 나타내었다. 거더는 단일박스로 구성되고 교량받침은 지점별로 하부플랜지의 박스코너 양쪽에 각각 설치하는 것으로 가정하였다.

## 2. 교좌장치 배치 형태에 따른 반력

곡선교량에는 편심하중이 없어도 자체의 자중만으로도 비틀림모멘트가 유발된다. Fig. 3은 곡선교량에서 전단중심을 기준으로 수직력과 비틀림모멘트가 작용할 경우 곡률내측(concave side) 및 곡률외측(convex side)의 각 지점에 발생될 수 있는 반력의 범위를 도식적으로 보여주고 있다. 직선교량이라면 수직하중  $W$ 에 의한 내·외측의 지점에는 동일한 크기의 정반력  $W/2$ 가 발생된다. 그러나 곡선교량의 경우 비틀림모멘트의 출현으로 외측에는  $T/B$ 만큼의 추가 정반력이, 내측에는 동일크기의 추가 부반력, 즉 하향의 반력이 발생하게 된다. 여기서,  $T$  및  $B$ 는 작용되는 비틀림모멘트 및 받침간 수평거리를 각각 의미한다. 수직력과 비틀림모멘트가

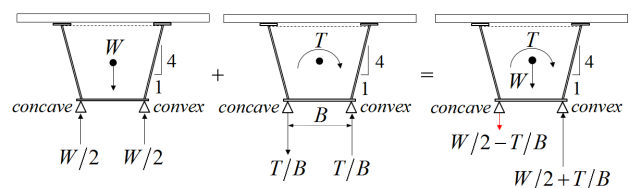


Fig. 3 Combination of reactions due to applied vertical load and torsional moment

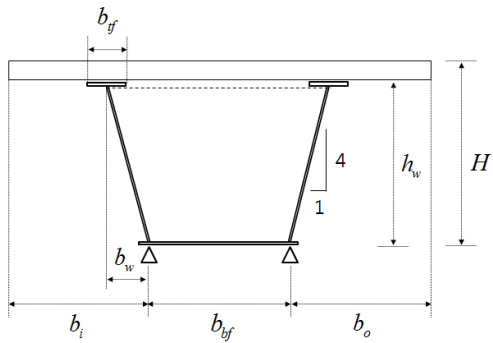


Fig. 4 Notation for composite box girder cross-section

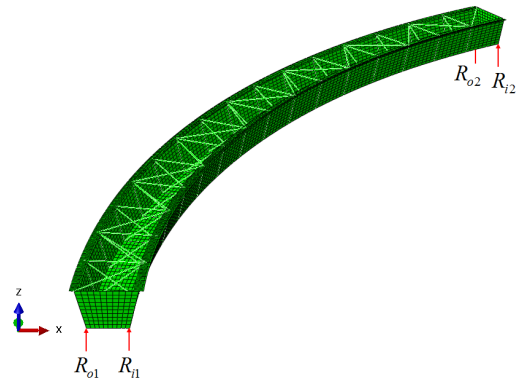


Fig. 5 Finite element model for steel box girder

Table 1 Dimension of composite box girder cross-section

Width of top flange, $b_{tf}$	0.46m
Width of bottom flange, $b_{bf}$	2.06m
Height of web, $h_w$	1.98m
Horizontal distance between bearing and center of top flange, $b_w$	0.50m
Horizontal distance between bearing and slab edge, $b_i, b_o$	1.00m
Thickness of slab ( $H - h_w$ ), $t_{slab}$	0.25m
Thickness of top flange, $t_{bf}$	0.05m
Thickness of bottom flange, $t_{bf}$	0.03m
Thickness of web, $t_{web}$	0.014m

동시에 작용하게 되는 경우에는 내·외측 지점에 서로 다른 크기의 반력이 발생되며, 비틀림모멘트가 상대적으로 크게 작용하는 경우 Fig. 3의 우측 그림에 도식화되어 있는 바와 같이 내측 지점에는 부반력이 발생하게 된다. 교좌장치의 배치 형태에 따른 반력을 비교하기 위해 적용된 콘크리트-강 합성박스 거더의 형상을 Fig. 4에 보였고, 각 부재의 치수는 Table 1에 보인 바와 같다. 강재의 탄성계수는 200GPa, 포아송비 0.3, 거더의 길이는 단일경간으로 적용가능한 수준으로 판단되는 48.8m로 가정하여 고정하였다. 곡률반경의 범위를 36.1~99.6m(내부각도로는 0.49~1.35rad)만큼 변경시키면서 곡률 반력특성을 분석하였다. 범용구조 해석 프로그램인 ABAQUS(2012)을 이용하여 탄성해석을 수행하였고 모델링한 강박스 거더의 형상은 Fig. 5에 보였다. 강박스를 구성하는 상부 수평브레이싱 및 내부 수직브레이싱에 해당하는 각 부재에는 3차원 트러스 요소(T3D2)가 사용되었고, 상부 및 하부 플랜지와 복부판의 경우에는 3차원 쉘요소(S4R)가 사용되었다. 종방향 패널의 수는 16개이며 수평브레이싱은 SD(single diagonal) 형식으로 배치하였으며, 박스거더 단면의 뒤틀림(distortion)을 방지하기 위한 내부 수직브레이싱은 X-프레임 형식을 가정하였다. 콘크리트가 균기전의 비합성 단계를 가정하여 콘크리트는 모델링하지 않고

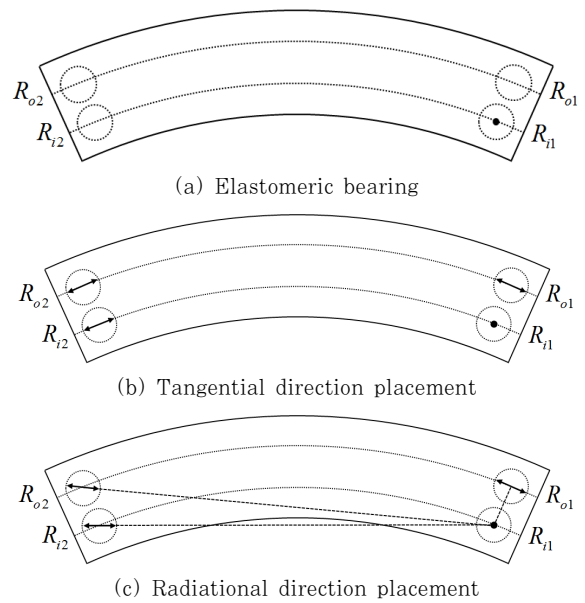


Fig. 6 Notation for composite box girder cross-section

하중으로 고려되어 상부플랜지에 재하하였다.

교량받침형식에 따른 반력의 특성을 알아보기 위하여 Fig. 6에 보인 바와 같이 3가지 서로 다른 교량받침형식 및 배치를 고려하였다. 탄성받침(elastomeric bearing)은 고무재료의 교량받침으로 간단한 형식이면서 하중의 전달이 효과적이며 모든 방향으로 신축 및 회전이 가능하기 때문에 효용성이 높아 사용성이 높은 받침으로 평가된다. 고정받침을 사용하는 경우 교량받침의 배치방법에 대해서는 변위허용방향을 방사상의 현방향(radiational direction)으로 설치하거나 곡선반경에 대해 접선방향(tangential direction)으로 변위를 허용하도록 제안하고 있다. 특히 곡선교량의 온도에 의한 거동을 고려할 때는 접선방향보다는 방사현방향이 효율적인 것으로 알려져 있다(Nakai and Yoo, 1988). 한국도로공사 도로설계요령(Korea Expressway Corporation, 2009)에 의하면 접선방향으로 받침장치를 설치하는 방법은 곡률이 일

정한 교량에 적합하고, 방사현방향 설치는 곡률이 일정하거나 변화하는 교량 모두에 적용이 가능한 것으로 제안하고 있다. Fig. 6에 보인 3가지 배치형식을 Fig. 4 및 Table 1에 보인 예제교량을 대상으로 상부 플랜지에 수직방향으로 분포하중을 재하한 경우 각 지점에서 반력을 평가·비교하였다. 해석시 강재단면은 자중으로 처리되고 굳지 않은 콘크리트 바닥판은 자중을 환산하여 상부플랜지에 분포하중으로 재하하였다. 이 때 기타 시공중 하중으로 콘크리트 바닥판 자중의 50%를 추가로 고려하였다. Fig. 7(a)~7(c)는 곡률계수 (curvature parameter)로 사용된 L/R의 변화에 따른 수직방향 및 수평방향 반력을 보여준다. 정(+ ) 및 부(-)의 값

은 각각 정반력 및 부반력을 의미하는데, 상향 및 외측방향을 각각 정방향으로 정의한다. 세 가지 교량받침 배치형식 모두 곡률효과에 따라 상당한 수준의 부반력이 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 7(a)에는 탄성받침을 사용한 경우로 수평반력은 발생하지 않는다. 점선으로 보인 반력의 크기는 곡률이 없는 직선교의 경우 4개의 지점에서 동일한 크기로 나타나는 수직반력의 크기를 의미한다. 직선교에 비해 곡률을 가지는 경우 정반력 및 부반력의 크기가 고려된 구간에서 7~8배 수준까지 발생됨을 확인할 수 있다. Fig. 7(b) 및 7(c)에는 수직반력 및 구속된 방향에 대한 수평반력의 크기도 함께 보여준다. 접선방향 배치의 경우 수평반력의 크기는 미미한 수준으로 평가되나 방사현으로 배치된 경우 곡률계수 (L/R)가 1.0을 넘어서면서 수평반력이 크게 증가됨을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 탄성받침이 설치된 단경간 곡선 강박스 거더교량에 발생하는 반력의 크기를 해석적으로 산정하는 기법을 개발한다.

### 3. 해석적 방법에 의한 부반력 산정식

곡선교는 기하학적으로 상부구조의 고정하중에 의해서 거더단면이 큰 비틀림을 받을 수 있고 이는 지점부에서 부반력의 발생으로 이어진다. 본 장에서는 부반력이 발생하는 내측 지점( $R_{i1}$ ,  $R_{i2}$ ) 및 외측지점( $R_{o1}$ ,  $R_{o2}$ )을 포함하여 단경간 교량 4개 반력 크기를 예측하기 위해 곡선교량 상부구조를 세부적으로 분리한다. 콘크리트로 구성된 바닥판 및 강재로 구성된 하부플랜지는 각각 면(area)의 개념을 가지는 기하학적 환형섹터(geometrical annular sector), 수평면내에서 폭이 좁게 투영되어 나타나는 상부플랜지 및 복부판을 선(line)의 개념을 가지는 기하학적 호(geometrical arc)로 가정될 수 있다. 평면내 환형섹터에 대한 개념도를 Fig. 8에 보였는데 균질한 재료로 구성되었을 경우 자중에 의한 네 지점에서의 반력을 해석적으로 구할 수 있다. 또한 콘크리트

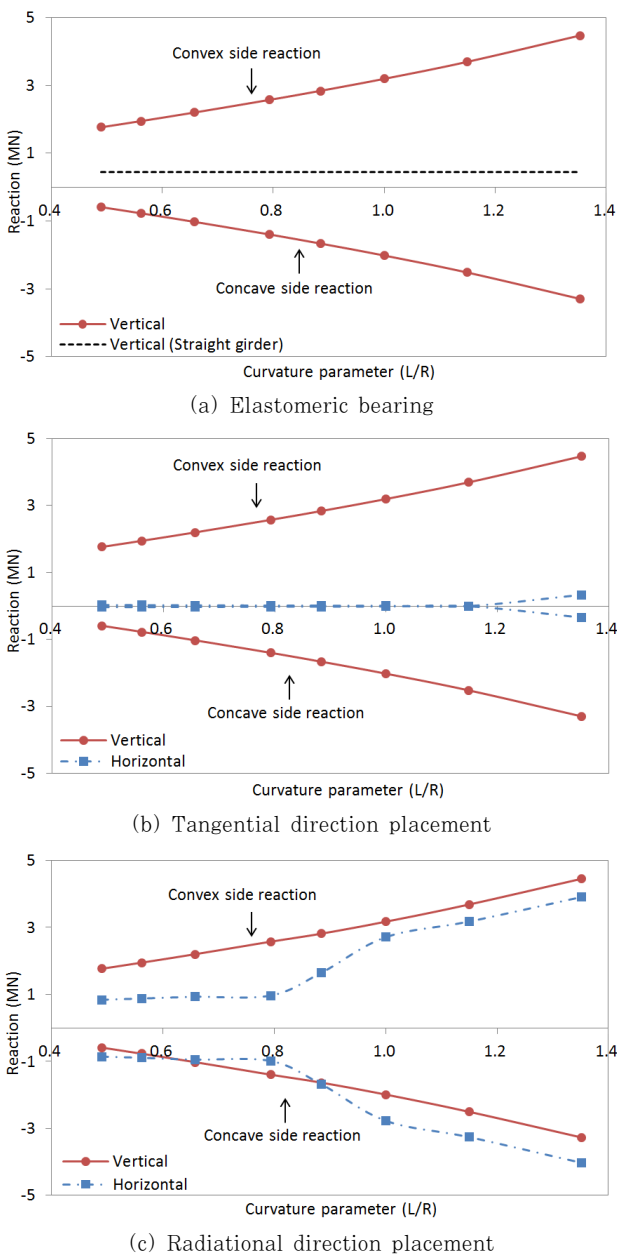


Fig. 7 Reaction versus curvature

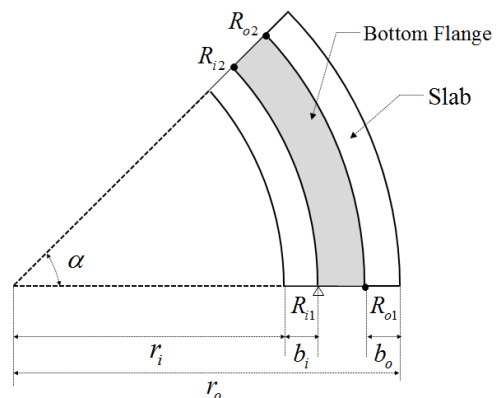


Fig. 8 Geometrical annular sector

바닥판 및 강재 하부플랜지는 반력에 대한 각각의 영향을 선형적으로 합산하여 전체 반력으로 고려될 수 있다. 단면특성 및 정력학적 평형이론을 적용하면 반력의 크기 및 방향에 대한 해석적 유도가 가능하다.

3.1 면분포 하중 작용시 반력

2차원 평면에서 기하학적 환형섹터는 Fig. 9에 보인 바와 같이  $r$ 과  $\theta$ 로 표현되는 극좌표계상 너비가 곡률반경  $r_i$ 에서  $r_o$ 까지이며, 곡률각  $\alpha$ 를 가지는 것으로 표현된다. 교량받침은  $\theta=0$  및  $\theta=\alpha$ 에서 곡률반경  $r_i$  및  $r_o$ 에서 반경방향으로  $b_i$  및  $b_o$  만큼 각각 바깥쪽 및 안쪽으로 떨어진 곳에 위치한다고 가정한다. 또한 곡률 시점 및 중점 위치에서 각 외측 교량받침을 지나는 축을  $x$ 축으로, 곡률중심으로부터 환형섹터를 절반으로 나누는 축을  $y$ 축으로 하는 직교좌표계를 추가적으로 정의한다. Fig. 9의 극좌표계에서 빗금 친 부분은  $(r, \theta)$ 에 위치해 있는 미소면적을 나타내며 그 크기는 식 (1)로 표현된다.

$$dA = r \cdot dr \cdot d\theta \tag{1}$$

한편 정의된 직교좌표계의  $x$ 축과 평행하고 환형섹터의 곡률중심을 지나는  $x'$ 축을 정의하고 이 축에서 극좌표계상의 임의의 위치  $(r, \theta)$ 에 있는 미소면적  $dA$ 까지의 거리  $y'$ 은 다음과 같다.

$$y' = r \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) \tag{2}$$

외측 지점을 연결한 축, 즉  $x$ 축을 기준으로 환형섹터에

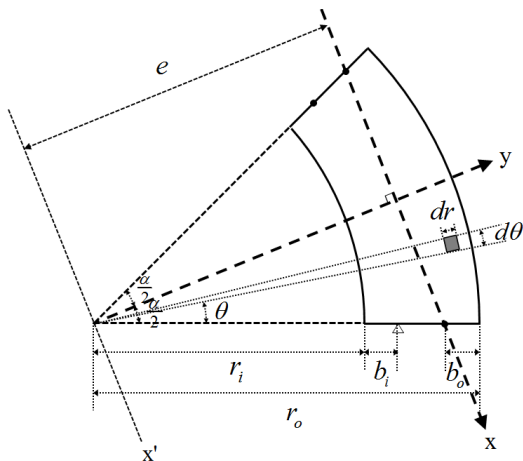


Fig. 9 Polar and cartesian coordinate system of annular sector

작용하는 면분포 하중  $w$ 가 발생시키는 모멘트가 양(+ )이면 내측 지점에는 정반력이, 부(-)이면 후반력이 발생된다. 정의에 의해  $x$ 축에 대한 모멘트는 다음과 같이 표현된다.

$$M_x = \int wy dA \tag{3}$$

여기서, 두께가 일정하고 균질한 판에 대한 자중만을 고려할 경우  $w$ 는 일정한 값을 가지므로 식 (3)은

$$M_x = w G_x \tag{4}$$

로 표현될 수 있다. 여기서  $G_x$ 는  $x$ 축에 대한 면적의 단면1차모멘트이다. 앞서 정의된  $x'$ 축에 대한 환형섹터의 단면1차모멘트는 식 (5)로 산정될 수 있다.

$$G_{x'} = \int y dA = \int_{\theta=0}^{\theta=\alpha} \int_{r=r_i}^{r=r_o} yr dr d\theta \tag{5}$$

식 (5)의 적분식을 정의된 극좌표계에서 수행하면

$$G_{x'} = \frac{2}{3} (r_o^3 - r_i^3) \sin \frac{\alpha}{2} \tag{6}$$

을 얻고 환형섹터의 면적  $A$ 와  $x'$ 축에서  $x$ 축까지의 거리  $e$ 는 각각 식 (7) 및 (8)과 같다.

$$A = \frac{\alpha}{2} (r_o^2 - r_i^2) \tag{7}$$

$$e = (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2} \tag{8}$$

평행축의 원리를 적용하면  $x$ 축에 대한 단면1차모멘트는 식 (9)로 표현된다.

$$G_x = G_{x'} - A \cdot e \tag{9}$$

식 (6)~(8)을 식 (9)에 대입하여 정리하면

$$G_x = \frac{2}{3} (r_o^3 - r_i^3) \sin \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha}{2} (r_o^2 - r_i^2) (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2} \tag{10}$$

을 얻는다. 식 (10)에 Fig. 8에 보인 하부플랜지의 형상을 대입하면 하부 플랜지에 대한 단면1차모멘트를 식 (11)에 보인 바와 같이 얻을 수 있다.

$$G_{bf} = \frac{2}{3} \{ (r_o - b_o)^3 - (r_i + b_i)^3 \} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (11)$$

$$- \frac{\alpha}{2} \{ (r_o - b_o)^2 - (r_i + b_i)^2 \} (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2}$$

한편 수직반력과 모멘트에 대한 정력학적 평형은 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\Sigma F_z = 0; \quad 2(R_o + R_i) = W_T \quad (12)$$

$$\Sigma M_x = 0; \quad 2(R_i d) = M_x \quad (13)$$

여기서,  $W_T$ 는 고려된 환형섹터의 총중량을 나타내고,  $d$ 는 내측 지점  $R_i$ 에서  $x$ 축까지의 거리로서 식 (14)와 같다.

$$d = b_{bf} \cdot \cos(\alpha/2) \quad (14)$$

여기서,  $b_{bf}$ 는 각 지점부에서 교량받침 사이 거리이다. 본 연구에서는 하부플랜지 폭과 동일하다. 환형섹터가 여러 개 고려되는 경우 각각에 대한 자중과 단면1차모멘트의 곱을 선형적으로 합하면 최종 모멘트로 결정된다. 즉  $n$ 개의 환형섹터가 고려되었다면 모멘트는 다음 식으로 정식화될 수 있다.

$$M_x = \sum_{i=1}^{i=n} G_{x,i} \cdot w_i \quad (15)$$

식 (14)와 (15)를 식 (12) 및 (13)에 대입하고 연립하여 풀면 내측 및 외측 반력  $R_i$ 와  $R_o$ 를 각각 식 (16) 및 (17)와 같이 얻는다.

$$R_i = \frac{1}{2b_{bf} \cos(\alpha/2)} \sum_{i=1}^{i=n} G_{x,i} \cdot w_i \quad (16)$$

$$R_o = \frac{W_T}{2} - R_i \quad (17)$$

### 3.2 접선방향 선분포 하중 작용시 반력

수평면내에서 폭이 좁게 투영되어 나타나는 상부플랜지 및 복부판은 선(line)의 개념을 가지는 기하학적 호(arc)로 가정될 수 있다. 이는 접선방향으로 Fig. 10에 보인 바와 같이 선분포 하중으로 작용하는 것으로 모델링될 수 있다. 곡률중심으로부터  $r$ 만큼 떨어진 위치에서 호방향으로 선하중이 재하될 때 임의의 위치  $a(r, \theta)$ 에서 미소 호의 길이  $ds$ 는 다음과 같다.

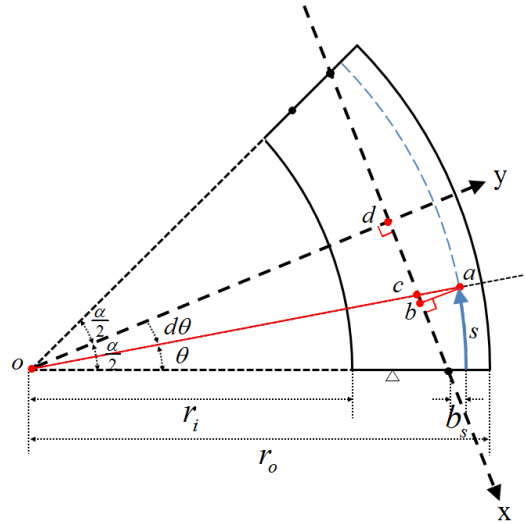


Fig. 10 Line loading along arc length coordinate "s"

$$ds = r \cdot d\theta \quad (18)$$

정의된 직교좌표계상의  $x$ 축에서부터 미소 호의 위치  $a(r, \theta)$ 까지의 수직 거리  $y$ 는 Fig. 10에 나타난 선분  $ab$ 의 길이이며 기하학적 성질을 이용하여 간단히 하면 식 (19)로 나타낼 수 있다.

$$y = r \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \theta\right) - (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2} \quad (19)$$

호의 길이를 따라 작용하는 단위길이당 선하중  $w_s$ 가  $x$ 축을 기준으로 발생시키는 모멘트는 정의에 의해 다음과 같다.

$$M_x = \int_{s=0}^{s=r \cdot \alpha} y w_s ds$$

선하중의 크기가 일정할 경우 모멘트는 앞서 식 (4)에서 보인 형태와 유사하게 식 (20)과 같이 표현될 수 있다.

$$M_x = w_s G_{x,s} \quad (20)$$

여기서  $G_{x,s}$ 는

$$G_{x,s} = \int_{s=0}^{s=r \cdot \alpha} y ds \quad (21)$$

로 표현되는 선에 대한 단면1차모멘트이고, 식 (21)을 극좌표계에서  $\theta$ 의 적분식으로 표현하고 직접 적분을 수행하면 식 (22)를 얻는다.

$$G_{x,s} = \int_{\theta=0}^{\theta=\alpha} r \left\{ r \cos \left( \frac{\alpha}{2} - \theta \right) - (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2} \right\} d\theta$$

$$= r \left\{ 2r \sin \frac{\alpha}{2} - \alpha (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (22)$$

곡선 강박스 거더 교량에서 접선방향 선분포 하중을 유발하는 요소는 상부플랜지(*f*)와 복부판(*w*)가 있는데, 이들은 다시 곡률 내측(*i*) 및 외측(*e*) 요소로 분류된다. 각각의 경우에 맞도록 식 (22)에 곡률반경 *r*값을 대입하면 내·외측 상부플랜지와 내·외측 복부판의 단면1차모멘트를 식 (23)~(26)처럼 얻을 수 있다.

$$G_{if,s} = (r_i + b_i - b_w) \left\{ \alpha (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2} - 2(r_i + b_i - b_w) \sin \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (23)$$

$$G_{ef,s} = (r_o - b_o + b_w) \left\{ 2(r_o - b_o + b_w) \sin \frac{\alpha}{2} - \alpha (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (24)$$

$$G_{iw,s} = \left( r_i + b_i - \frac{b_w}{2} \right) \left\{ \alpha (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2} - 2 \left( r_i + b_i - \frac{b_w}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (25)$$

$$G_{ew,s} = \left( r_o - b_o + \frac{b_w}{2} \right) \left\{ 2 \left( r_o - b_o + \frac{b_w}{2} \right) \sin \frac{\alpha}{2} - \alpha (r_o - b_o) \cos \frac{\alpha}{2} \right\} \quad (26)$$

3.1절에서 보인 경우와 유사하게 식 (20)으로 산정한 모멘트를 식 (16) 및 (17)에 대입하면 선하중에 대한 곡률내측 및 외측의 지점반력 *R<sub>i</sub>*와 *R<sub>o</sub>*를 각각 구할 수 있다.

#### 4. 예제해석

본 예제에 사용되는 곡선 강박스 거더의 형상은 2장에서 보인 Fig. 4와 같고, 각 부재의 길이 및 두께는 Table 1에 보인 바와 같다. 거더의 길이는 48.8m로 고정하고 곡률반경을 변경시키면서 곡률의 영향인자로서 곡률계수 L/R로 표현하였다. 4개 지점에 설치된 교량받침은 탄성받침으로 가정하여 자중만을 고려한 유한요소해석을 수행하였다. 강-콘크리트 합성박스 거더에 적용된 강재 및 콘크리트의 자중은 Table 2에 보인 바와 같다. Table 3에는 반력산정식에 적용된 각 부재별 전체 자중을 보였다.

Fig. 11은 단경간 곡선 강박스 거더 예제 교량에 대해 유도된 공식으로 얻은 반력 *R<sub>i</sub>* 및 *R<sub>o</sub>*값을 범용구조 해석 프로그램인 ABAQUS로 탄성해석을 수행하여 얻은 결과 값과 비

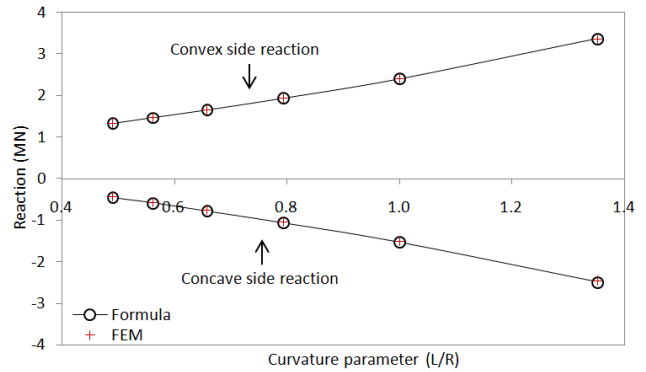


Fig. 11 Reaction comparison from derived formula and FEM

Table 2 Specific weight of steel and concrete used

Steel, <i>w<sub>steel</sub></i>	77.1kN/m <sup>3</sup>
Concrete, <i>w<sub>conc</sub></i>	22.8kN/m <sup>3</sup>

Table 3 Total weight of composite steel-concrete composite box girder

Slab	1148.3kN
Bottom flange	235.8kN
External top flange	90.1kN
Internal top flange	84.6kN
External web	112.6kN
Internal web	106.9kN
Total weight	1778.4kN

교한 것이다. *x* 축은 곡률의 정도를 표시하는 계수로서 *R/L* 값을 나타내며 *y* 축은 반력을 나타낸다. 본 연구에서 해석적 방법에 의해 개발된 산정식으로 결정된 반력의 크기 및 방향은 수치해석 결과와 매우 잘 부합한다는 사실을 Fig. 11에서 확인할 수 있다.

#### 5. 결 론

경간장 48.8m를 가지는 단경간 곡선 강박스 거더교량에 대해 내부곡률각도를 0.49~1.35rad로 조정하면서 곡률효과에 따른 지점에서 발생하는 수직반력을 분석하였다. 수직 반력의 크기는 곡률효과에 따라 동일단면 직선교량 대비 7~8배 수준까지 증가될 수 있음이 확인되었다. 또한 반반력 발생가능성을 고려하여 반력 크기를 예측하기 위해 곡선교량 상부구조를 세부적으로 분리하여 각 요소가 반력에 미치는 영향을 정량적으로 고려하여 반력산정식을 개발하였다. 콘크리트 바닥판 및 강박스 하부플랜지는 각각 면의 차원을 가지는 기하학적 환형섹터로, 수평면내에서 폭이 좁게 투영되는 상부플랜지 및 복부판은 선의 차원을 가지는 기하학적 호로 가정되었다. 제안된 반력산정식의 형식은 비교적 단순하고

그 예측값은 유한요소해석으로 얻은 값과 비교하였을 때 오차가 1%미만일 정도로 잘 일치하였다. 유한요소해석 수행 없이 부반력의 발생여부를 확인하는 1차 검토수단으로 본 제안식이 실무설계시 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 2014년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 것임.

### References

- AASHTO (2004) AASHTO Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges 2003, *American Association of State and Highway Transportation Officials*, Washington, D.C.
- AASHTO (2004) AASHTO LRF Bridge Design Specifications, 3<sup>rd</sup> Ed., *American Association of State and Highway Transportation Officials*, Washington, D.C.
- ABAQUS Inc. (2010) *ABAQUS analysis user's manual Version 6.10*, Pawtucket, RI.
- Gupta, T., Misra, A. (2007) Effect on Support Reactions of T-Beam Skew Bridge Decks, *ARPN J. Eng. & Appl. Sci.*, 12(1), pp.1~9.
- Kim, J. (2010) Control of the Negative Reactions Developing in Simple Curved Steel-Box Girder Bridges, M.S. Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea.
- Kim, K. (2004) Research on horizontally curved steel box girders, Ph.D. Dissertation, Auburn University, Auburn, AL, USA.
- Kim, S., Lee, Y., Cho, K. (2004) Analysis of Horizontal Reactions due to Moving Vehicle Load in curved Bridges with Varied Support Conditions, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 24(1), pp.143~150.
- Korea Expressway Corp. (2009) *Roadway Design Manual*, 3<sup>rd</sup> Ed., Korea Expressway Corporation.
- Lee, G.C.M., Sennah, K.M., Kennedy, J.B. (2002) Curved Steel Box-Girder Bridges at Construction Phase, *Adv. Steel Struct. (JCASS)*, 2, pp.807~814.
- Park, C., Lee, H. (2012) Negative Support Reactions of the Single Span Twin-Steel Box Girder Curved Bridges with Skew Angles, *J. Korea Inst. Struct. Maint. & Insp.*, 16(4), pp.34~43.
- Park, J. (2008) Negative Reactions of Curved Concrete Box-Girder Bridges, M.S. Thesis, KAIST, Daejeon, Korea.
- Park, S., Gi, S., Ryu, D. (2007) The Case Study on Reaction Problems of the Curved PSC Box Girder Bridge Constructed by FSM, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 11(1), pp.30~35.
- Samman, M., Kennedy, J.B. (2001) Comparative Structural Behaviour of Multi-Cell and Multi-Spine Box Girder Bridges, *Struct. Eng., Mech. & Comput.*, 1, pp.583~590.
- Shimizu, S., Yoshida, S. (1991) Reaction Allotment of Continuous Curved Box Girders, *Thin-walled Struct.*, 11(4), pp.319~341.
- Simpson, M.D. (2000) Analytical Investigation of Curved Steel Girder Behaviour, Ph.D. Dissertation, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Vlasov, V.Z. (1961) *Thin-walled Elastic Beams*, Israel Program for Scientific Translations Ltd., Jerusalem.

### 요 지

평면내 곡선교량은 편심하중뿐만 아니라 자중만으로도 비틀림하중을 받게 되고, 이는 지점부 부반력 발생의 원인이 된다. 본 논문에서는 경간장 48.8m를 가지는 단경간 곡선강박스 거더교량에 대해 내부곡률각도를 0.49~1.35rad으로 조정하면서 곡률효과에 따라 지점에서 발생하는 수직반력을 분석하였다. 부반력 발생가능성을 고려하여 반력 크기 및 방향을 예측하기 위해 곡선교량 상부구조를 각 독립된 요소로 분리하여 반력산정식을 해석적으로 개발하였다. 콘크리트 바닥판 및 강재 하부플랜지는 각각 면의 차원을 가지는 기하학적 환형섹터로, 수평면내에서 폭이 좁게 투영되어 나타나는 상부플랜지 및 복부판은 선의 차원을 가지는 기하학적 호로 가정되었다. 제안된 반력산정식의 형식은 비교적 단순하고 그 예측값은 유한요소해석으로 얻은 값과 비교하였을 때 오차가 1% 수준으로 잘 일치하였다.

**핵심용어** : 곡선교량, 비틀림하중, 단경간, 부반력, 반력산정식, 환형섹터