

# 소수주형 수평곡선 강교량 상부구조의 자유진동 특성 분석

이기세<sup>1</sup> · 김승준<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>연구교수, 고려대학교, 건축사회환경시스템공학부, <sup>2</sup>조교수, 대전대학교, 건설안전방재공학과

## Free-vibration Characteristics of Two-I-girder Steel Bridges Curved in Plan

Lee, Kee Sei<sup>1</sup>, Kim, Seungjun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Research Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, Dept. of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University, Daejeon, 34520, Korea

**Abstract** - In the case of the superstructure which is consist of two I girders and slab, the section can behave as II section, so that the neutral axis with respect to out of plane direction flexure can be regarded as major axis. Therefore in-plane flexural mode might govern the free vibration mode. Meanwhile, horizontally curved girders always experience not only bending moments but also torsional moments although the primary load is usually supposed to be gravitational load. The interaction due to bending and torsional moments make the behavior complicated and torsional mode may govern the free vibration mode. In other words, structure can have different dynamic characteristic due to its initial curvature. In this research, using 3-dimensional sell elements, free-vibration analyses are carried out due to initial curvature. The analysis models are assumed to be composite and non-composite and finally natural frequency and eigen mode are discussed.

**Keywords** - Horizontally Curved, Free vibration, Composite, Dynamic Characteristic, Steel Bridge

### 1. 서론

본 해석 연구에서는 소수주형 곡선 플레이트 거더 교량 상부 구조물의 자유진동 특성에 대한 해석적 접근을 다룬다. 일반적으로 플레이트 거더 교량은 구조물의 전체 질량 및 질량분포와 함께 전장, 단면 및 길이방향으로의 기하학적 특성, 구속조건 등에 따라 고유한 진동 모드 및 주파수가 결정된다. 단면의 국부적인 거동을 제외한 전체 거동의 측면에서는 크게 A. 강축방향 휨 모드 (면내), B. 약축방향 휨 모드 (면외), C. 비틀 모드 등으로 구분할 수 있고, 이는 구조물의 전체 질량의 기여도가 동일하다는 가정 하에 결국 각 모드에 대한 강성 크기에 따라 모드의 발현순서가 정해진다. 소수주

형 거더는 개별 거더가 측면 (교축 직각 방향) 방향으로 일정한 간격을 두고 배치되고, 상부 슬래브가 타설되어 그 강성이 전체 구조물에 기여한 후부터는 교축 직각 방향으로의 휨강성이 면내방향보다 오히려 크게 나타날 수 있다. 다시말해 합성 후에는 상부구조 전체가 II형 단면의 형태를 띄게 되어 개별거더의 약축방향은 단면 전체에서의 강축방향이 된다. 즉, 상부 콘크리트 슬래브가 거더에 합성된 이후부터 상부 구조물의 주요 진동 모드는 연직방향 (약축) 휨모드 또는 비틀모드가 나타날 것으로 예상이 가능하다. (본 논문에서는 독자들의 혼동을 방지하기 위해 직선/곡선 모델의 합성 전후 대하여 연직 방향에 대한 휨 거동을 “면내”, 이에 대해 직각인 방향을 “면외”라 지칭한다)

그러나 곡선 플레이트 거더의 경우 곡률에 따라 지배하는 진동 모드가 직선 플레이트 거더와는 상이할 수 있다. 특히, 거더의 중심각이 증가 (곡률 증가)할수록 지배하는 진동 모드는 점차 비틀모드로 변화하게 되는 것은 충분히 예상 가능한 사항이다. 그러나 합성 후 곡선교량에 대한 자유진동특성에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

Kang and Choi(1995)<sup>[1]</sup>는 곡선 보요소를 정식화 하고 이

Note.-Discussion open until April 29, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 1, 2016; revised August 31, 2016; approved on September 1, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-42-280-4574 Fax. +82-42-280-2576

E-mail. skim@dju.kr

를 이용하여 자유진동 해석을 수행 할 수 있는 토대를 마련하였고 후속 연구로, 이를 범용 유한요소 해석 프로그램과 비교하였다<sup>[2]</sup>. 이는 뒀을 고려한 곡선 보 요소의 검증 연구로서 그 가치를 지나나, 곡선 거더의 자유진동 특성에 대한 자세한 고찰은 수행되지 않았다. 이후 Yoon *et al.*(1998)<sup>[3]</sup>은 수평곡선 교량에서 가로보가 자유진동에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 그러나 이는 모두 합성 전 곡선 교량에 대한 해석이며, 7자유도 곡선 보 요소를 사용하여 수행 되었다. 이들 연구로서 7자유도 곡선 보 요소를 이용한 정적/동적 해석의 정확성이 입증 되었다고 할 수 있다. 그러나 보요소를 사용한 자유진동 해석은 고차 모드일수록 높은 정확도를 기대하기 어렵다. 곡선 교량은 곡률이 커짐에 따라 비틀림 거동의 중요도가 높아지며, 자유진동 해석에서 비틀림 모드는 주로 2차모드 이후에서 나타남을 고려하면, 아직까지는 곡선 교량의 자유진동 특성은 쉘요소를 이용하여 검토하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

한편 Lee *et al.*(1997)<sup>[4]</sup>은 변화 곡률을 갖는 수평곡선 보에 대한 지배미분방정식을 유도하고 이를 수치해석적으로 풀어내어 그 결과를 실험 연구와 비교 하였다. 제안된 방법에서는 전단 변형과 순수 비틀림은 고려하였으나 뒀은 고려하지 않았다. 이후 이를 이용하여 스프링으로 지지된 곡선보와<sup>[5]</sup> 자유진동 특성에 대한 연구<sup>[6]</sup>를 수행하였으나, 뒀에 대한 고려가 이루어 지지 않아 개단면을 갖는 상부구조 해석에는 그 정확성이 떨어진다 할 수 있다.

해외에서는 국내보다 일찍이 수평 거더의 자유진동에 관한 연구가 시작 되었다. Tabba and Turkstra(1977)<sup>[7]</sup>는 박스 거더의 자유진동에 관하여 지배 미분방정식을 유도하고 자유진동 해석을 수행 하여 직선거더와 다른 거동 양상을 밝혀냈다. 이후 곡선 거더에 대한 연구가 활발히 진행되어 Wang *et al.*(1980)<sup>[8]</sup>은 다경간 수평곡선 거더의 동적 처짐각 방정식을 유도하였고, Snyder and Wilson(1992)<sup>[9]</sup>는 다경간 수평곡선 거더에 대한 편미분 방정식을 유도하였다. Yoon *et al.*(2005)<sup>[10]</sup> 등은 Kang and Yoo(1996)<sup>[11],[12]</sup>에 의해 개발된 7자유도 곡선보요소를 이용하여 다양한 경계조건과 단면강성을 매개변수로 자유진동 특성을 규명하려 하였다. 또한 Yang *et al.*(2008)<sup>[13]</sup>은 유한요소 해석을 이용하여 평면 내 자유진동 해석을 수행하였다.

그러나 상기된 연구들은 대부분 해석 기법이나 지배미분 방정식에 대한 연구이며, 합성이후에 대한 모델을 대상으로 하고 있지 않다. 본 연구에서는 곡률을 매개변수로 슬래브

합성 전후에 대한 모델을 3차원 Shell요소로 모델링 하여 자유진동 해석을 수행하고 이에 대한 동적 특성을 정리 하였다. 수치해석은 Abaqus 6.12를 이용하였다.

## 2. 구조해석

### 2.1 해석 모델

Fig. 1은 본 연구에서 검토한 소수주형거더의 단면을 나타낸다. I형 단면을 갖는 플레이트 거더가 슬래브 및 상부구조를 지지하고 있고, 주 거더 사이에는 I형 단면 가로보가 있다 (거더 간 간격: 6.4 m, 가로보 간 간격: 5.0m).

서론에 기술한 바와 같이 상부구조의 고유진동 모드는 초기곡률의 영향을 받을 수 있다. 또한 소수의 I형 거더로 이루어진 상부구조의 경우 합성 전에는 거더의 개별적인 거동이 가능하나 합성 후에는 콘크리트 슬래브와 거더가 II형 단면으로서 함께 거동하기 때문에, 합성 전/후 모델은 서로 다른 구조물이라는 인식에서 출발하는 것이 타당하다. 다시 말해 본 해석으로써, 곡률에 따른 구조물의 고유 진동 특성과 시공단계에 따른 구조물의 동특성 변화를 예측 할 수 있다.

본 해석 연구에서는 Fig.1의 단면구성을 갖는 2주형 플레이트 거더교량 상부구조에 대해서 Fig. 2와 같이 원곡선을 갖는 곡선 선형으로 가정하여 곡률이 상부구조물의 진동특성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 중심각  $\theta$

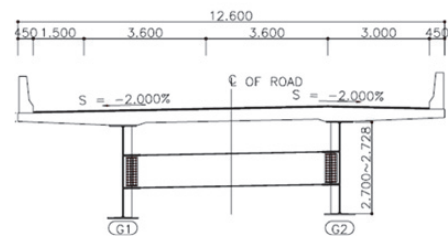


Fig. 1. Section of superstructure

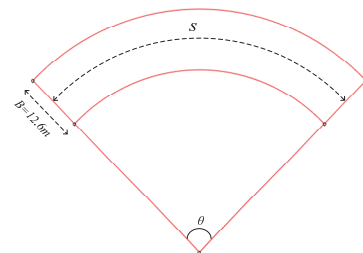


Fig. 2. Plan of superstructure

에 대하여 0°, 5°, 10°, 30°, 45°, 60° 등 총 6개 조건에 대해 고려하였다 (지간길이 및 호의 길이  $s$ 는 60.0 m로 동일). 주 거더 및 가로보의 단면 형상은 Fig. 3과 같이 가정하였고, 주요 제원은 Table 1과 같다.

강재의 경우 탄성계수는 210GPa, 프아송계수  $\nu=0.3$ , 단위중량은  $7,800\text{kg/m}^3$ 을 가지며 콘크리트 슬래브 (density:  $2,200\text{kg/m}^3$ ,  $E_c=26,000\text{MPa}$ ,  $\nu=0.2$  가정)는 폭 12.6m, 높이 0.5m로 가정하였다.

ABAQUS CAE 6.12를 사용하여 구조모델링부터 구조해석까지 진행하였다. 거더 및 가로보는 4절점 쉘요소 (S4R)를 사용하였고, 콘크리트 슬래브는 8절점 솔리드요소 (C3D8R)를 사용하여 구조물을 모델링하였다. 또한 슬래브 합성 모델의 경우, 슬래브와 거더의 상부 플랜지 간 접촉면 조건에 대해서는 ABAQUS가 제공하는 구속 조건 중 tie 옵션을 적용하였다.

경계조건은 각 힌지/롤러 조건 및 양 단 비틀 구속을 가정하였고, Fig. 4와 같이 사전구속조건을 해석 모델에 반영하였다. 곡선 거더의 경우, 원통형 국부좌표계를 사용하여 접선방향(원호방향)으로 교축방향을 설정하였으며 경계조건 또한 원통형 좌표계에 따라 설정하였다. 결론적으로 곡선 거더의 교축방향 구속은 지점에서 접선 방향으로 설정되었다.

### 2.2 직선 거더의 자유진동 특성

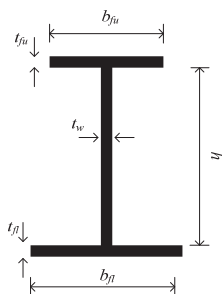


Fig. 3. Section of the girder

Table 1. Section properties of main girder

	Main girder	Cross beam
$b_{fu}$	800.0mm	400.0mm
$b_{fl}$	900.0mm	400.0mm
$h$	2,700.0mm	950.0mm
$t_{fu}$	30.0mm	14.0mm
$t_{fl}$	30.0mm	14.0mm
$t_w$	24.0mm	14.0mm

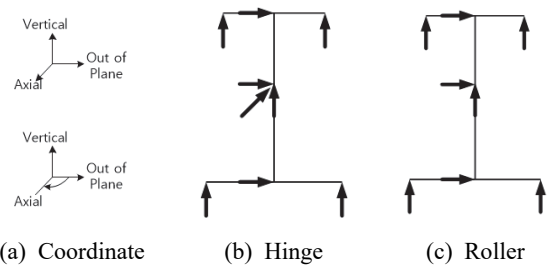


Fig. 4. Boundary conditions

Fig. 5는 슬래브 합성 전 직선거더모델의 고유진동모드를 보여준다. 슬래브 합성 전에는 면외방향 휨거동에 대한 강성이 가장 작으므로 면외방향 휨 변형이 최 저차 모드로 나타난다. 이후 면내방향 휨 모드, 그리고 비틀 모드 순서로 고유진동모드가 도출되었다.

이에 반해 Fig. 6과 같이 슬래브가 합성된 이후에는 두 거더의 완전한 합성으로 비틀 및 면외 방향 휨 모드가 첫 번째

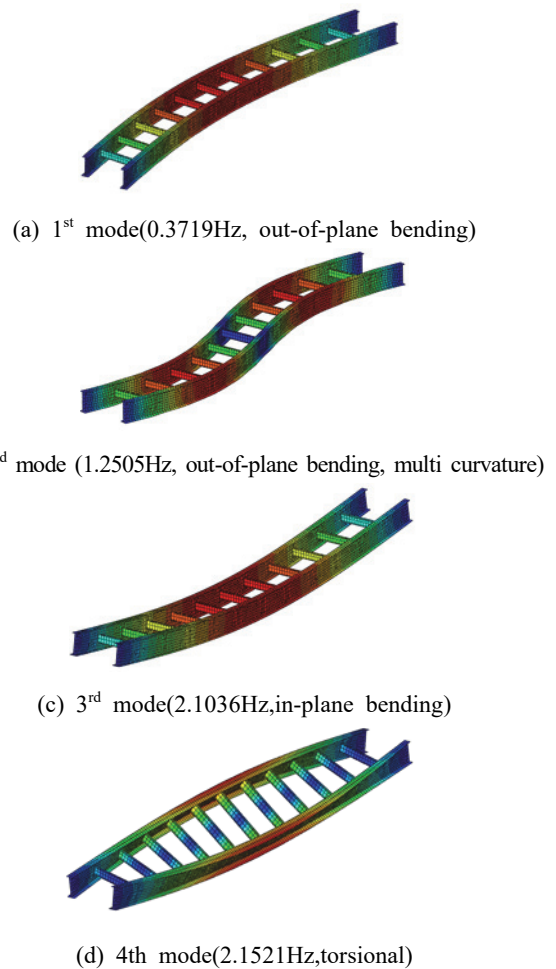
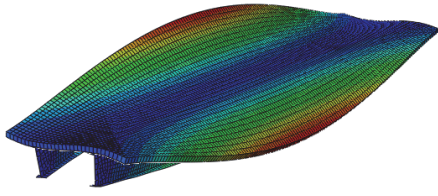
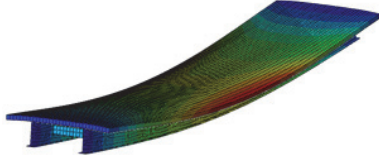


Fig. 5. Free vibration mode-noncomposite



(a) 1<sup>st</sup> mode(1.340Hz, out-of-planebending)



(b) 2<sup>nd</sup> mode (1.373Hz, out-of-plane bending, ultracurvature)

Fig. 6. Free vibration mode - composite

고유진동모드로 나타났고 이 후 면내방향 휨 모드가 나타났다. 이 때 고유주파수는 슬래브 합성 이후 단면 전체의 면내/외 방향 휨 강성 및 비틀 강성이 커졌음에도 불구하고 오히려 합성 전 동일 모드의 주파수보다 낮았는데 (비틀 모드: 2.152 → 1.340Hz, 면내 방향 휨 모드: 2.1036 → 1.373Hz), 이는 비틀 강성이 증가한 것보다 슬래브 합성 이후 질량 증가가 진동특성에 더 기여했기 때문이다. 특히, 슬래브의 질량 분포는 거더에 비해 더 넓게 분포하므로 비틀 모드를 더 쉽게 일으킬 수 있다. 즉, 결과적으로 슬래브 합성 이후 휨 및 비틀 모드는 합성 전보다 오히려 더 작은 고유 주파수를 갖는 결과를 보였다.

### 2.3 곡선 거더의 자유진동 특성

본 절에서는 소수주형 곡선 거더 교량 상부구조물의 고유진동특성에 대해 분석한다. 앞서 언급한대로 중심각을 5~60°의 범위로 변화를 주어 곡률이 고유진동특성에 미치는 영향에 대해 해석적으로 접근하였다. Figs. 7~11은 합성 전 곡선거더의 고유진동모드를 나타낸다.

먼저, 검토된 모든 해석모델에서 1차 고유모드는 면외 방향 휨 모드로 나타났다. 중심각이 상대적으로 작은 경우 (5°, 10°), 두 번째 모드 역시 면외 방향 휨 모드 (double curvature)로 나타났으며 그 후 3차 모드에서 비틀 모드가 나타났다. 곡선 거더의 경우 면내방향 휨 모드는 곡선의 기하학적 특성에 따라 그 변형이 단독으로 나타날 수 없다. 따라서 비틀 모드에서 면내 방향 휨 모드가 함께 나타나는 특성을 보였다. 중심각이 30° 이상의 모델부터 두 번째 모드가

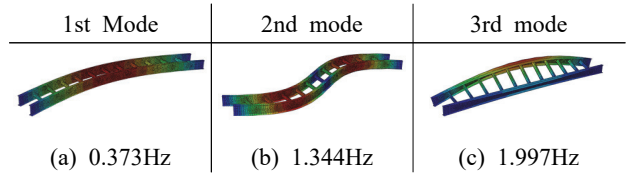


Fig. 7. Free vibration modes of the noncomposite curved girder model,  $\theta = 5^\circ$

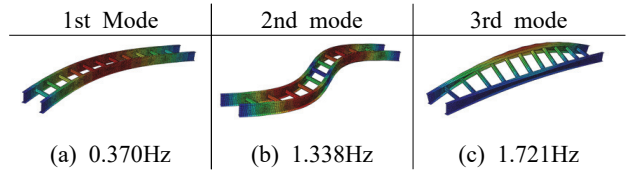


Fig. 8. Free vibration modes of the noncomposite curved girder model,  $\theta = 10^\circ$

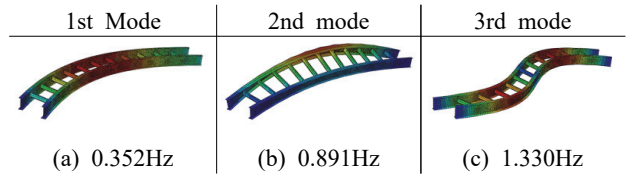


Fig. 9. Free vibration modes of the noncomposite curved girder model,  $\theta = 30^\circ$

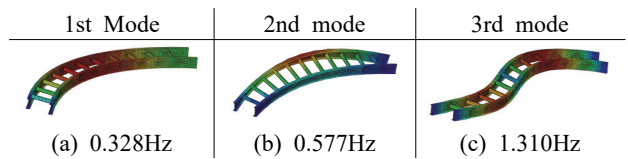


Fig. 10. Free vibration modes of the noncomposite curved girder model,  $\theta = 45^\circ$

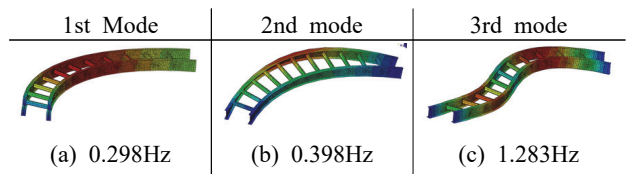
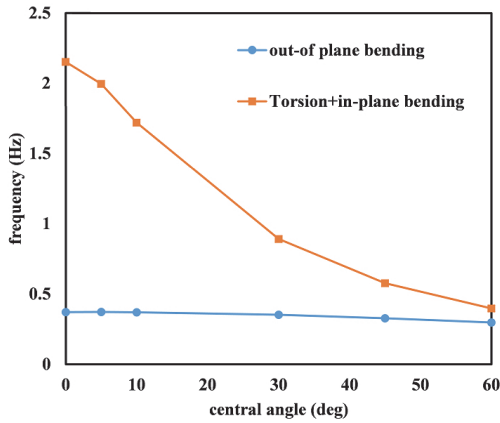


Fig. 11. Free vibration modes of the noncomposite curved girder model,  $\theta = 60^\circ$

비틀 모드로 나타났다. 일반적으로 구조물의 자유 진동에 대한 고유주파수는 구조물의  $\sqrt{k/m}$  ( $k$ : 강성,  $m$ : 질량)에 비례하는데, 곡률이 증가할수록 비틀 거동에 대한 강성이 휨 강성 보다 그 감소폭이 커짐에 따라 저차모드의 발현순서가 바뀌게 된다. 아래 Fig. 12는 중심각에 따른 면외 방향 휨 모드와 비틀 모드의 주파수 변화를 나타내는데, 비틀 모드 주

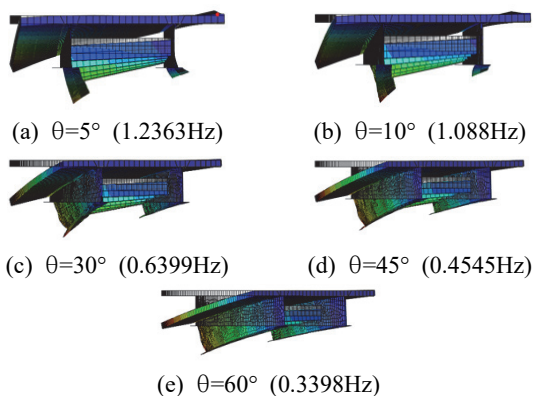


**Fig. 12.** Relation between subtended angle and natural frequencies of the free vibration mode (for non-composite curved model)

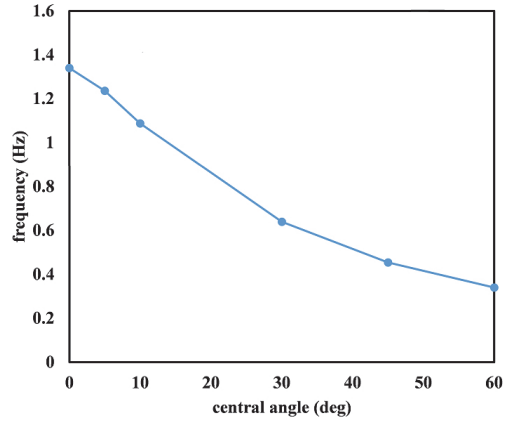
파수의 감소율이 확연히 더 큰 것을 알 수 있다. 즉, 곡률이 본 연구에서 고려한 수준 이상으로 증가하게 되면 자유진동에 대한 1차 모드는 비틀림 모드로 나타날 것은 쉽게 예상 가능하다.

Fig. 13은 슬래브 합성 후 고유진동특성을 나타낸다. 슬래브의 합성 후 곡선 거더에서는 합성 후의 직선 거더와 마찬가지로 휨 모드+비틀림 모드가 최저 모드로 나타났다 (그 후의 모드는 주로 거더와 합성되지 않은 슬래브 구간에서의 국부 진동모드로 이는 본 연구에서는 분석을 생략한다).

흥미로운 점은 중심각의 증가에 따라 면외 방향 휨 변형이 눈에 띄게 감소한다는 점이다. 다시 말해, 직선 및 곡률이 작은 모델에 비해 곡률이 증가할수록 비틀림의 영향이 증대되는 것을 의미한다. 이는 곡률 변화가 비틀림 거동의 강성변화에 미치는 영향과 직결되는 사항인데, 곡률이 증가함에 따라 질량 중심점 역시 수평으로 이동하고 이것이 구조물에 편심으



**Fig. 13.** 1st free vibration modes of the composite curved girder model



**Fig. 14.** Relation between subtended angle and natural frequencies of the 1st free vibration mode (for non-composite curved model)

로 작용, 비틀림 및 강축 방향 휨 변형을 추가로 야기한다. 따라서 곡률이 증가함에 따라 비틀림 모드가 지배적으로 나타나게 된다.

Fig. 14는 곡률변화에 따른 1차 모드 고유주파수 변화를 나타낸다. 구조물의 곡률이 증가할수록 구조물의 강성이 감소하므로 동일 질량에 대해서 결과적으로 주파수 역시 감소하게 된다. 다시 말해 곡률이 증가할수록 구조물의 고유 주기가 길어지게 된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 소수주형 곡선 거더 교량의 고유진동특성을 분석하였다. 상부구조가 초기 곡률을 갖는 경우, 비틀림 모드가 저차 모드에서 나타날 수 있으며, 이로 인하여 고유 주파수는 직선교와 크게 달라질 수 있다. 이는 교량 설계 시 공진 회피 측면에서 중요한 요소가 될 수 있을 뿐 아니라, 상부 구조의 동적 거동에 비틀림 모드가 주요하게 작용함을 의미 한다.

비합성 거더의 경우 각 거더는 면외방향으로 개별적인 거동이 가능하기 때문에 1차 모드는 면외방향 휨 모드를 띄었고, 해당 진동 모드에 대한 고유 주파수는 곡률의 증가에 큰 영향을 받지 않았다. 그러나 곡률이 증가함에 따라 비틀림 강성이 감소하여 3차 모드에서 나타났던 비틀림 모드가 2차 모드에서 발견 되었다. 뿐만 아니라 비틀림 모드에 대한 고유 주파수는 크게 감소하였으며, 곡률 중심각이 60°인 모델에서는 면외방향 휨 모드와 거의 비슷한 값을 가지게 되었다.

한편 합성 후 모델에서는 각 거더가 개별적인 거동이 불가능하므로, 상부구조가 초기곡률을 가질 경우 1차모드부터 휨과 비틀림의 복합 모드가 나타나게 된다. 비틀림 거동이 발현되는 이러한 자유진동 모드는 곡률이 증가함에 따라 고유주파수가 급격히 감소하며, 곡률 중심각이 60°인 경우 합성 단면은 비합성 단면과 거의 비슷한 고유 주파수를 가지게 된다. 이는 상부 구조에 대한 초기 곡률 효과의 영향을 단적으로 보여주는 예로, 램프 교량과 같이 곡률이 큰 경우에는 설계 및 해석 시 곡률 효과에 의한 동특성을 반드시 반영해야 한다는 점을 시사한다.

본 연구는 단순 지지된 단경간 곡선 거더로 한정되어 수행되었다. 경간의 구성이나 경계조건, 가로보 형식, 주거더와 가로보의 강성비 및 가로보 간격 등은 소수주형 곡선 거더교량의 진동 특성에 영향을 주는 주요 변수로 예상할 수 있는 만큼, 이에 대한 추가 연구가 수행된다면 소수 주형 곡선 거더의 동적 거동 특성을 보다 명확하게 규명하고 이해하는 데에 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

### 감사의 글

이 성과는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015R-1C1A1A01052250).

### 참고문헌(References)

[1] 강영중, 최영준(1995) 박판수평곡선보의 자유진동, 한국강구조학회지, 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.

[2] 윤기용, 강영중(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 Curved I-Girder Bridges Using the Finite Element Method, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.10, No.1, pp.47-61 (in Korean).

[3] 윤기용, 강영중, 이규세(1998) 가로보가 수평곡선 I형교의 자유진동에 미치는 영향, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제18권, 제5호, pp.687-697.  
Yoon, K.Y., Kang, Y.J., and Lee, K.S. (1998) Cross Beam Effects on Free Vibration of Horizontally Curved I-Girder Bridges, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.18, No.5, pp.687-697 (in Korean).

[4] 이병구, 모정만, 오상진(1997) 변화곡률을 갖는 수평 곡선보의 자유진동해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제17권, 제6호, pp.837-843.  
Lee, B.K., Mo, J.M., and Oh, S.J. (1997) Free Vibrations of Horizontally Curved Beams with Variable Curvature, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 17, No.6, pp.837-843.

[5] 이병구, 진태기, 최규문, 이태은(2001) 여러 개의 스프링으로 탄성 지지된 수평 곡선보의 자유진동, 한국소음진동공학회논문집, 한국소음진동공학회, 제11권, 제5호, pp. 101-107.  
Lee, B.K., Jin, T.K., Choi, K.M., and Lee, T.E. (2001) Free Vibrations of Horizontally Curved Beams with Multiple Elastic Springs, *Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol.11, No.5, pp. 101-107 (in Korean).

[6] 이병구, 이태은, 이종국, 안대순(2003) 회전관성 및 비틀림관성을 고려한 수평곡선보의 자유진동, 대한토목학회논문집 A, 대한토목학회, 제21권, 제1A호, pp.113-119.  
Lee, B.K., Lee, T.E., Lee, J.K., and Ahn, D.S. (2003) Free Vibrations of Horizontally Curved Beams Considering Both Rotatory and Torsional Inertias, *Journal of Korean Society of Civil Engineers A*, KSCE, Vol.21, No.1, pp. 113-119 (in Korean).

[7] Tabba, M.M., and Turkstra, C.J. (1977) Free Vibrations of Curved Box Girders, *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, Vol.54, No.4, pp.501-514.

[8] Wang, T.M., Nettleton, R.H., and Keita, B. (1980) Natural Frequencies for Out-of-Plane Vibrations of Continuous Curved Beams, *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, Vol.68, No.3, pp.427-436.

[9] Snyder, J.M., and Wilson, J.F. (1992) Free Vibrations of Continuous Horizontally Curved Beams, *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, Vol.157, No.2, pp.345-355.

[10] Yoon, K.-Y., Kang, Y.-J., Choi, Y.-J., and Park, N.-H. (2005) Free Vibration Analysis of Horizontally Curved Steel I-Girder Bridges, *Thin-Walled structures*, Elsevier, Vol.43, No.4, pp.679-699.

[11] Kang, Y.J., and Yoo, C.H. (1996) Thin-Walled Curved

- Beams, I: Formulation of Nonlinear Equations, *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol.120, No.10, pp.2072-2101.
- [12] Kang, Y.J., and Yoo, C.H. (1996) Thin-Walled Curved Beams, II: Analytical Solutions for Buckling of Arches, *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol.120, No.10, pp.2102-2125.
- [13] Yang, F., Sedaghati, R., and Esmailzadeh, E. (2008) Free In-Plane Vibration of General Curved Beams Using Finite Element Method, *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, Vol.318, pp.850-867.

---

**요 약 :** 두 개의 I형 거더로 이루어진 소수주형 교량의 경우, 합성 후 슬라브와 거더가 하나의 단면으로 인식될 수 있으며, 이에 따라 평면 외방향의 휨에 대한 중립축은 강축으로 간주 될 수 있다. 따라서 자유진동 모드에서는 평면 내의 휨거동이 지배적일 것이라 쉽게 예상할 수 있다. 그러나 곡선 교량은 직선교량과 달리 초기곡률로 인하여 중력하중 하에서도 항시 비틀림 모멘트가 작용한다. 휨과 비틀림의 상호 작용은 거더의 거동을 복잡하게 하며, 때에 따라서는 비틀림 모드가 휨모드보다 지배적으로 작용할 수 있게 된다. 다시 말해, 같은 환경 하에서 곡선교량은 초기 곡률에 따라 동특성이 달라질 수 있게 된다. 현재까지 수평 곡선 거더의 자유진동에 관한 연구는 많이 이루어져 왔으나 합성 거더에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 곡률 중심각의 변화에 따른 모드 변화와 고유 주파수의 변화를 3차원 모델링을 통하여 검증 하였다. 해석 모델은 합성 전후에 대하여 작성 되었으며, 고유 주파수와 진동 모드 변화를 고찰하였다.

**핵심용어 :** 수평곡선, 자유진동, 합성, 동특성, 강교

---