

경량전철용 곡선 2주형 판형교의 적용성에 관한 연구

A Study on the Structural Analysis of Curved Two Girder Bridges for AGT System

성택룡*, 윤태양**, 이안호***
Seong, Taek-Ryong Yoon, Tae-Yang Lee, An-Ho

Abstract

This research has investigated structural characteristics of curved two girder bridges proposed for AGT system, and analyzed the results of the structural analysis of three different modelings for 3 span continuous bridge, each modeled in grillage modeling, simplified 3D modeling, and detailed 3D modeling respectively.

The grillage modeling appeared to be somewhat underestimated in deflection, and overestimated in rotation with respect to 3D modelings. Also, it is impossible to make a detailed examination of local buckling and details of cross beams, etc. The point that warping effect cannot be considered may cause the structural analysis unsafe, accordingly the structural analysis of curved two girder bridges should be done with 3D modelings.

1. 서론

경량전철은 주로 도심지의 교통수단으로 이용되므로 고가구조물 설계시 급곡선 구간의 형성이 불가피할 것으로 예상되며 이에 따라 현재 국내에서 개발중인 경량전철 시스템의 최소곡선반경은 본선에서는 40m, 측선에서는 30m까지로 하고 있다[3]. 본 연구에서는 이에 발맞추어 경량전철용으로 곡선 2주형 판형교를 제안하였으며, 이는 유선형의 외형미와 선형미를 가지고 있으므로 도시미관을 효율적으로 증가시킬 수 있을 것으로 예상되고, 직선보를 사용하는 것에 비해 하부구조의 감소를 가능하게 하여 하부공간을 활용할 수 있고, 이로 인한 공사비의 절감과 공기단축 등의 효과를 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이러한 경량전철의 특성을 고려하여 제안한 곡선 2주형 판형교의 구조적 특징을 고찰하고 3경간 연속교에 대하여 격자형 모델링, 간략 3D 모델링, 상세 3D 모델링의 해석결과를 비교 분석하였으며 이에 따른 적절한 해석방법을 선정하였다.

2. 곡선 2주형 판형교의 개요

2.1 거동특성

곡선 2주형 판형교는 2주형 판형교의 고유한 특징과 더불어 곡률의 존재로 인해 발생하는 곡선

* 포항산업과학연구원 토목구조연구팀, 책임연구원, 비회원

** 포항산업과학연구원 토목구조연구팀장, 수석연구원, 비회원

*** 한국철도기술연구원 시스템기술개발팀장, 선임연구원, 회원

보만의 특성을 추가적으로 고려하여야 하며, 곡선보의 초기곡률로 인해 그 거동이 상당히 복잡한 양상을 갖게되므로 국내에서는 많이 실용화되지 못하고 있다[4,5]. 일반적으로 곡선보에서는 비틀림과 단면의 수평 및 연직방향의 변위성분들이 서로 커플링되어 종속적으로 거동을 하며 또한 비틀림의 결과로 종방향 인장이 생길 수 있다. 또한, 연직방향의 하중만이 작용하는 상태에서도 곡선 판형교에서는 휨뿐만 아니라 비틀림도 같이 받게된다. 이러한 휨과 비틀림의 연계 거동으로 인해 곡선 판형의 플랜지에 작용하는 법선응력은 직선 판형의 경우와 달리 휨 법선응력(bending normal stress)에 추가적으로 뒹 법선응력(warping normal stress)이 유발된다.

그러나, 휨 거동과 연계하여 발생하는 비틀림거동은 곡률에 의해 추가적으로 발생하는 거동으로 곡률이 상당히 작은 경우에는 직선 판형교의 거동과 비슷한 양상을 보일 수 있다. 이에 따라, AASHTO에서는 일정 한계곡률 내의 교량에 대해서는 직선교와 동일하게 설계하여도 좋다고 규정하고 있다[4].

2.2 구조해석 및 모델링 방법

이처럼 곡선 2주형 판형교는 비틀림 거동에 의하여 구조적 거동이 복잡해지며 이러한 복잡한 거동을 잘 반영하기 위해서는 구조해석과 모델링에 세심한 주의를 기울여야 한다. 일반적으로 곡선보에 대한 해석은 근사적인 방법으로서 평면 격자해석법(The Plane Grid Method), 공간골조법(The Space Frame Method), V-Load법(The V-Load Method) 등이 있고, 엄밀한 해석방법으로는 유한요소법, 유한차분법, 유한대판법 등을 들 수 있다.

교량 설계를 위한 모델링 방법은 설계에서 많이 사용하는 보요소를 이용한 2차원 격자형 모델링 방법과 셸을 이용한 3차원 모델링 방법이 일반적이다. 그 중 보요소를 이용한 격자형 모델링의 경우 단면 제상수를 수계산을 통해 계산하는 번거로움은 있지만 모델링이 단순하므로 해석을 수행함에 있어 시간과 노력이 절약되는 장점을 가지고 있다. 또한 해석 결과가 휨에 대해서는 그 강성의 표현이 비교적 정확하고 보요소의 특성상 어느 정도 보수적인 값을 표현하므로 휨이 주로 발생하는 구조(일반 직선교)의 표현에 있어서 매우 적합한 모델링 방법이다. 그러나 일반적으로 사용되는 6자유도 요소의 경우, 휨과 함께 비틀림이 동시에 발생하는 곡선교의 경우에는 그 거동을 정확하게 표현하는데 어려움이 따른다. 보요소를 이용한 방법에 비해 셸(Shell)과 솔리드(Solid) 요소를 이용한 3차원 모델링(이하 상세 3D 모델링)의 경우 각 부재의 형상을 셸과 솔리드요소를 이용하여 모두 표현하는 방법이므로 곡선 보의 거동 특성을 비교적 정확히 표현할 수 있다. 그러나, 이런 정확성이라는 장점에도 불구하고 설계에서 잘 적용되지 않는 이유로는 일반적인 직선형 교량의 해석에 있어 주된 거동 인자가 휨이므로 보요소의 적용만으로도 충분한 거동의 표현이 가능하다는 점과 셸 요소 사용의 비경제성에 있다. 다른 하나의 방법은 간략 3D 모델링으로서 이는 매우 많은 자유도를 사용하는 상세 3D 모델링의 단점을 보완하여 모델링 소요 시간과 해석 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다. 이 방법은 거더의 상/하부 플랜지가 셸로 모델링 되어진 복부판과 절점을 공유하는 보요소로 모델링하는 것이다. 또한 가로보를 같은 강성을 표현할 수 있는 보요소로 모델링한다. 이를 통해 상세 3D 모델링에 비해 자유도의 수를 대폭 줄일 수가 있는 것이다.

3. 구조해석

3.1 개요

본 연구에서는 곡선 2주형 판형교를 대상으로, 일반적으로 많이 쓰이는 구조해석 프로그램 (SAP2000)의 6자유도 보요소를 사용한 것과 범용해석 프로그램(ABAQUS)의 4절점 쉘요소 및 8절점 솔리드 요소를 사용하여 실교량 제원의 단면을 적용한 상세 3D 모델링, 그리고 4절점 쉘요소 및 보요소를 사용한 간략 3D 모델링 등 3가지에 대하여 각기 해석을 수행하였다. 하중은 경량전철시스템 기술개발사업[3]에서 개발중인 고무차륜 AGT 시스템의 차량하중인 축중 9톤을 적용하고 기본 편성인 2량 1편성의 하중을 적용하였다. 해석 대상교량의 지간은 40m로 하였으며 3경간 연속교(총 경간장 120m)에 대해 해석하였다. 단면과 길이의 변화 없이 내부중심각은 경간당 30도가 되도록 하였다. 따라서, 곡선반경은 약 76m로 구성되었다.

3.2 모델링 및 지점조건

해석에 사용된 교량의 단면과 지점조건, 부재의 제원은 아래 그림 1과 2, 표 1에 각각 나타내었다. 바닥판의 모델링은 간략 3D 모델에서는 쉘요소로, 상세 3D 모델에서는 솔리드요소로 하였으며 격자형 모델링의 경우 합성후 단면으로 고려하였고 계산된 단면상수의 값은 아래 표 2와 같다. 한편, 곡선교에서는 이동방향과 회전방향이 일치하지 않는다. 일반적으로 곡선교의 받침배치에 있어서 이동방향은 고정받침과 있는 방향으로, 회전축의 방향은 거더에 직각이라고 생각하는데 경우에 따라서는 거더의 접선방향으로 이동방향을 정하고, 횡방향의 구속력을 건널 수 있도록 받침을 배치하는 수도 있다. 본 연구에서는 접선방향으로 이동방향을 정하는 것으로 하였다.

3.3 재하하중

적용 하중은 앞서 언급한 고무차륜 AGT 하중을 아래 그림과 같이 주행로 폭원을 갖는 폭에 3절점으로 하여 바퀴당 1.5톤(4.5톤/3)으로 가력하였으며, 비틀림의 영향을 가장 크게 발현할 수 있도록 중앙 경간(제 2경간)의 바깥쪽 선로에 재하하는 것으로 하였다. 3D 모델의 경우 실제교량의 형상을 유사하게 모델링하므로 활하중은 모델링된 상판위에 직접 재하한다. 이와 달리 격자 모델의 경우 주형을 지점으로 가정하여 지점반력을 계산하여(하중의 횡분배) 격자 모델의 보요소에 집중하중으로 재하하였다.

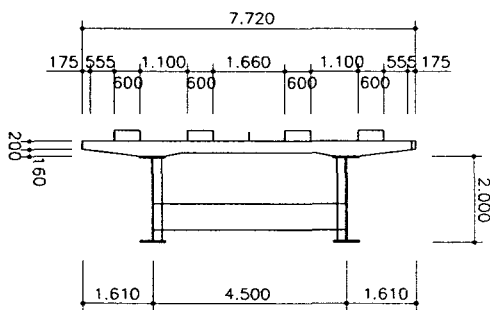


그림 1. 해석에 사용한 교량의 횡단면도

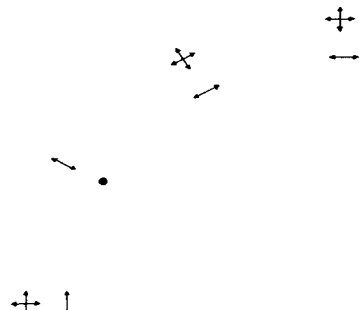


그림 2. 격자형 모델과 지점 조건

표 1. 주요부재의 단면제원

구분	주형	중간가로보	수직보강재
H	2,000	600	
B	600	350	
T _w	20	10	18
T _b	40	14	
T _l	40	14	

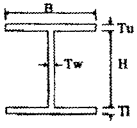


표 2. 격자 모델링을 위한 단면상수

구분	단면적 (mm ²)	비틀림상수 (mm ⁴)	I ₃₃ (mm ⁴)	I ₂₂ (mm ⁴)
단면상수	220,400	3.532E9	1.699E11	1.344E11

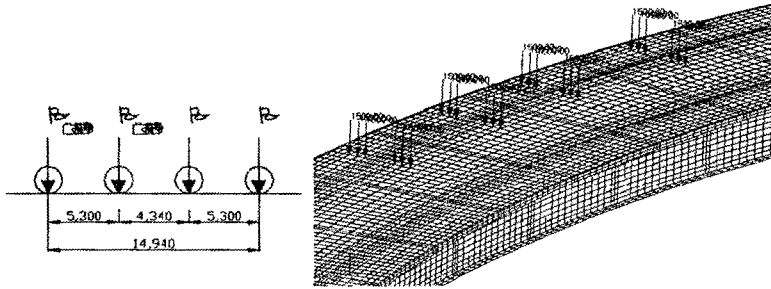


그림 3. 하중모형 및 3D 모델에서의 활하중 재하

3.4 모델링 비교

3가지의 모델별 요소수, 절점수 및 계산시간의 특징을 비교하면 다음과 같다. 해석계산시간은 Pentium 4(2.2GHz)와 Windows XP를 장착한 개인용 컴퓨터에서의 시간이다. 표 3에서 보듯이 격자 모델링은 요소수가 적어서 3D 모델링에 비해서 해석 시간이 적게 걸리나, 뒤흔효과를 표현 못하므로 곡선교 거동의 특징을 충분히 반영하지 못하게 된다. 상세 3D 모델링은 요소수가 가장 많으며, 간략 3D 모델은 요소수와 절점수가 상세 3D 모델의 절반 이상으로 대폭 줄고 해석에 소요된 시간도 약 절반 정도로 감소하였다.

표 3. 모델링별 특징 비교

	격자 모델링	간략 3D 모델링	상세 3D 모델링
요소수	121	21,106	44,588
절점수	98	20,845	54,678
해석계산시간	약2초	약63초	약132초

4. 해석결과

정모멘트가 최대 지점인 경간 중앙에서의 처짐과 회전량을 해석 모델별로 정리하여 표에 나타내었다. 처짐량은 중앙경간(두번째 경간)의 중앙에서 관찰한 외측거더와 내측거더의 처짐량을 각각 구한후, 둘을 평균한 평균 처짐이다. 회전량은 각 거더별 회전량을 구할 수도 있겠지만, 여기서는 각 거더의 처짐량의 차를 거더 사이의 거리로 나누어 구하였다. 즉 교량 전체의 회전량을 구한

것이다.

먼저 변형도를 살펴보면 하중의 재하에 따른 단면의 변형 양상을 세가지 해석 모델이 공히 잘 나타내고 있다. 평균 처짐은 격자형 모델링이 상세 3D 모델링에 비해 다소 작게 나와 약 97% 수준이며, 간략 3D 모델링이 가장 크게 나왔다. 3D 모델링이 격자형 모델링에 비해 처짐이 다소 크게 나온 것은 전단 변형이 고려되기 때문이다. 거더 전체의 회전을 나타내는 회전량에서는 격자 모델링이 상세 3D 모델보다 30% 정도, 간략 3D 모델보다 12%정도 크게 나왔다. 이는 거더와 바닥판의 강성이 커플링 되면서 회전에 저항하는 성질을 3D 모델에서는 비교적 잘 나타낼 수 있으나 격자 모델에서는 많이 간소화되므로 회전량이 더 크게 평가되기 때문인 것으로 생각된다.

상세 3D 모델이 가장 정확하다고 한다면 격자모델은 처짐이 다소 과소평가되고, 회전량은 과대평가되는 것으로 나타났으며, 이는 참고문헌[4]과도 잘 일치하는 것이다. 본 연구에서는 곡률의 변화에 따른 모델링 방법의 비교는 수행하지 못했으나, 일반적으로 곡률이 커질수록 격자 모델은 더 부정확한 값을 보인다[4]. 실무에서 현재 일반적으로 사용하고 있는 격자 모델은 직선교의 설계에서는 계산량과 업무량, 그리고 실용성 등으로 볼 때 유용한 방법이라고 생각되지만, 국부좌굴이나 가로보 상세 등 구조 상세부의 디테일한 검토가 불가하며, 특히 곡선교에서는 뒹효과를 무시하게 되므로 특정 케이스에서는 불안전축으로 평가될 우려가 있기 때문에 상세 3D 혹은 간략 3D 모델로 검토해야 할 필요성이 있다고 하겠다.

표 4. 모델별 해석 결과

항 목	격자 모델	간략 3D 모델	상세 3D 모델
최대처짐량	13.62mm	13.50mm	12.51mm
반대쪽거더	2.62mm	5.24mm	4.15mm
중앙부 평균처짐	8.12mm	9.37mm	8.33mm
회전량	0.00244rad	0.00218rad	0.00186rad
최대모멘트	179.4t · m	-	-
최대비틀모멘트	6.85t · m	-	-

5. 결론

본 연구에서는 경량전철의 특성을 고려하여 제안한 곡선 2주형 판형교의 구조적 특징을 고찰하고 3경간 연속교에 대하여 격자형 모델링, 간략 3D 모델링, 상세 3D 모델링의 해석을 수행하여 결과를 비교하였다. 격자모델은 처짐이 다소 과소평가되고, 회전량은 과대평가되는 것으로 나타났으며, 국부좌굴이나 가로보 상세 등 구조 상세부의 디테일한 검토가 불가능하다. 특히 곡선교에서는 뒹효과를 무시하게 되어 특정 케이스에서 불안전축으로 구조해석이 평가될 우려가 있기 때문에 곡선 2주형 판형교의 구조해석에는 상세 3D 혹은 간략 3D 모델로 검토해야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 “경량전철시스템 기술개발사업(선로구축물분야)”의 일부로서 수행되었으며 총괄주관기관인 한국철도기술연구원의 연구비 및 제반지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 철도청(1999), 철도설계기준(철도교편)
2. 건설교통부(2000), 도로교설계기준
3. 윤태양, 성택룡, 최원경, 이종관 등(1999), “경량전철시스템기술개발사업 4차년도 연구결과 보고서(분야:선로구축물), 연구보고서, 건설교통부, 포항산업과학연구원
4. 윤태양, 황민오, 성택룡 등(2002), “콘크리트 우위 경쟁력 향상 강교량 기술개발”, 연구보고서, 포항산업과학연구원
5. 임남형, 윤기용, 강영종(2000), “미래의 곡선교량”, 한국강구조학회지, 제12권 제1호, pp. 53~58