

고속철도 교량 주거더의 솟음량에 대한 소고.

Some thoughts on Camber in High-speed Railway Bridge

이병길*, 강현성**, 성인모**, 이진옥**, 임남형**†

Byoung-Kil Lee*, Hyun-Sung Kang**, In-Mo Sung**, Jin-Ok Lee**, Nam-Hyung Rim**†

Abstract Camber is applied to girders of a railway bridge to prepare deflections by various loads on the construction or train operation. Also, camber of a railway bridge is applied to Railway Design Standard(Roadbed) to calculate the amount of dead load deflection on main girders. However, it has caused structural stability maintaining minimum thickness in track's PCL designed excessive camber calculated the half of dead and live load in High-speed railway bridge. In this study, a suitability of camber prediction is analyzed on High-speed railway bridges.

Keywords : Railway Bridge, Camber, Deflection, Track, PCL

초 록 철도 교량의 거더에는 시공 단계나 열차 운영단계에서 발생할 연직처짐에 대비하여 솟음(Camber)을 두며, 현재 국내 철도교량의 솟음량은 철도설계기준(노반편)에 따라 주거더의 고정하중에 의한 처짐량을 산정하여 적용하게 된다. 그러나, 주거더의 고정하중과 활하중의 1/2을 함께 고려하여 설계한 일부 고속철도 교량에서 과도한 솟음량으로 인해 궤도 PCL 층의 최소두께 확보가 곤란하였으며, 이로 인해 궤도 PCL 층의 구조적 안전성 문제를 야기하였다. 이에 따라 본 연구는 고속철도 교량 솟음 산정기준의 적정성에 대해 검토하였다.

주요어 : 철도교량, 솟음, 처짐, 궤도, PCL

1. 서 론

철도 교량은 도로교량과 달리 매우 크고 복잡한 특성을 가진 다양한 하중과 일정 주기의 진동이 구조물에 전달됨에 따라 동적 거동이 유발되며, 다양한 요소의 영향을 잘못 예측할 경우 궤도의 틀림, 좌굴, 파단 등을 야기하여 열차 주행 안전성 확보에 불리하게 작용할 수 있으므로, 이를 정확히 계산하고 예측함으로써 다양한 요구조건을 충족시키는 것이 설계의 핵심이라 할 수 있다. 또한, 근래에는 교량 설계 시 구조적 안전성 뿐만 아니라 환경성이나 주변과의 조화를 강조하는 시대적 요구를 반영하여, 다양한 형식과 특수공법의 적용이 확대되고 있으며, 이런 시도들은 철도 기술 경쟁력 확보에 크게 기여할 것으로 기대된다. 그러나, 설계방식의

† 교신저자: 충남대학교 공과대학 토목공학과(nhrim@cnu.ac.kr)

* 한국철도시설공단 건설본부

** 충남대학교 공과대학 토목공학과

전환과정에서 궤도구조의 안전성 확보를 위한 요구조건을 우선시하는 교량 설계가 여전히 미흡한 것이 사실이며, 그 중 한가지로 교량의 솟음 문제를 들 수 있다. 교량의 연직처짐을 고려한 솟음(Camber)의 적용은 이미 규격화되어 있는 단경간 교량이나 자갈도상 교량에서는 크게 문제가 되지 않았으나, 콘크리트 궤도의 적용이 일반화되고 교량의 경간이 길어짐에 따라, 교량의 처짐과 솟음(Camber)량에 대한 적정 범위 예측을 통해 교량-궤도의 시공성과 구조적 안전성을 확보함으로써 고속 차량의 주행안전성을 확보할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 처짐의 영향과 솟음의 필요성, 솟음량 산정이론과 국내외 기준에 대한 검토를 통해 교량 설계 시 솟음 적용의 필요성에 대해 검토하고, 국내 고속철도 교량의 솟음 적용 현황과 이로 인한 문제점 등에 대한 검토를 통해 기존 고속철도 교량의 솟음량 산정기준의 적정성에 대해 분석하였다.

2. 본 론

2.1 솟음의 개요

2.1.1 솟음의 필요성

철도 교량의 거더에는 시공중이나 준공 이후 자중, 가설하중, 프리스트레스, 크리프, 건조수축, 온도하중 등 다양하고 복잡한 하중이 작용하며, 2차 고정하중이나, 활하중의 크기도 무시할 수 없는 수준이다. 따라서, 철도교량 설계 시에는 큰 변동하중을 고려하여 피로에 대한 저항성능이 큰 구조가 결정되어야 하며, 특히 열차의 고속주행에 따른 주행안전성, 승차감 등 동적안전성 요구조건을 만족시켜야 한다. 그 중 거더의 연직처짐은 열차 운행의 한계를 판단하는 중요한자이며, 시공단계의 계획고 유지, 준공 이후 교량의 외관 및 사용성에도 큰 영향을 미치므로 교량 설계자는 발생할 수 있는 처짐을 예측하고 그에 대비한 솟음을 뒀으로써 교량의 구조적 안전성, 시공성, 사용성 등을 확보할 수 있다.

2.1.2 솟음량 산정방법

교량의 솟음은 기본적으로 처짐을 예측하여 역방향의 곡선을 미리두는 것이므로, 적절한 솟음량 산정을 위해서는 처짐량을 정확히 예측하는 것이 중요하다. 처짐은 자중, 활하중 뿐만 아니라 콘크리트 압축강도, 탄성계수, 건조수축, 크리프, 프리스트레스 손실 등 다양한 인자의 영향을 받고 그 중 대부분은 시간의 영향을 받으므로 이로 인한 처짐을 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 일이며, 잘못된 예측으로 작은 양의 처짐이 발생할 경우 오히려 교량의 구조적 안전성, 시공성, 사용성 등에 불리하게 작용할 수 있다. 그러나, 보는 처짐 곡선이 이론적으로 포물선에 가깝고, 처짐의 크기는 경간 길이에 비해 매우 작기 때문에 적당한 정확도로 예측한다면 일반적으로 수용이 가능하다. 이에 따라, Ricker[1]는 보의 솟음(Camber)은 고정하중으로 인한 처짐의 일정 비율 또는 전체를 반영하거나, 활하중으로 인한 처짐의 일부를 추가로 반영하여 적용할 수 있으며, 고정하중과 활하중의 상대적인 비중, 활하중의 빈도와 강도,

유사한 부재들의 거동이력, 미확성 또는 그 외의 적절한 인자들을 고려하여 적용하도록 했다. 다만, Suprenat[2]는 캠버 계산시 어떤 하중을 어떻게 적용할 것인지에 대해서는 구조물의 특성과 상황을 고려하여 기술자가 판단해야 할 사항이며, 활하중의 영향을 얼마나 고려할 것인지는 신중하게 접근할 필요가 있다고 설명하였다.

2.1.3 해외 솟음량 산정기준

간단히 요약하자면, 캠버를 적용함에 따른 이득이 캠버의 계산이나 시공 등의 노력에 비해 비효율적인 단경간의 경우에는 굳이 캠버를 적용할 필요가 없으며, 장경간 교량에서도 가급적 작은 값으로 캠버를 설정할 필요가 있다. 이에 따라, 해외 각국에서는 교량의 목적, 형식, 지간 등을 고려하여 캠버 산정을 위한 하중 기준이나 한계치 등을 마련하여 적용하고 있다.

Table 1 International criterion for predicting

구분	캠버 산정 기준		
	지간(L)	적용방법	한계치
UIC Leaflet 776-3R	12m 이상	고정하중에 의한 처짐	L/1000
영국 강구조협회(SCI)	12m 이상	(고정하중+2차고정하중)에 의한 처짐	-
영국 GC/RC 5510	12m 이상	(고정하중 처짐) +(활하중에 의한 처짐의 1/2)	-
미국 강구조협회(AISC)	50ft(15m) 이하	-	0.5in(13mm)
	50ft(15m) 이상	50ft(15m) 초과 매 10ft(3.048m)당 1/8in(3mm) 증가	L/800
중국 콘크리트도상궤도 부설요구 조건	50m 이하	-	7mm
	50m 초과	-	L/7000 또는 14mm
중국 하다선	21m 이상	횡하중과 1/2 정하중의 처짐	-

2.2 국내 고속철도 교량 솟음량 산정기준의 적정성

2.2.1 국내 고속철도 교량 솟음 적용현황 및 문제점

2011년 개정된 국내 고속철도 설계기준에서는 강교 및 강합성교의 솟음량 산정 시 고정하중에 의한 처짐을 고려하도록 하고 있으며, 경부고속철도와 호남고속철도는 2011년 이전에 설계됨에 따라 솟음량 산정 시 고정하중과 1/2 활하중에 의한 처짐을 고려하여 설계되었다. 이는 1995년 프랑스 SYSTRA사의 고속철도 교량 설계기준 자문결과[3]에 기초한 것으로 판단된다. 호남고속철도 솟음량 검토결과[4]에 의하면, 50m의 지간을 가진 소수주형교에서 91.396mm의 솟음이 적용되었고, 이중 1/2 활하중에 의한 솟음으로 17.894mm가 적용되었다.

Table 2 The amount of camber remain on the construction time of on few member plate girder bridge (Honam high-speed rail way)

구분	대상하중	적용 솟음량 (mm)	궤도/노반 인수인계시 하중별 처짐(mm)
합성전 고정하중	강재 자중	51.102	-51.102
	콘크리트 자중		
2차 고정하중	궤도하중	22.400	-9.830
	차량탈선방호벽 등		
1/2 활하중	차량	17.894	-
계		91.396(A)	-60.932(B)
노반 시공마감면 높이 (단계별 최종 솟음량)		A-B	30.464

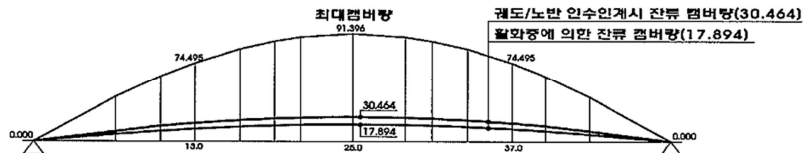


Fig.1 Camber of few member plate girder bridge

그러나, 궤도/노반 인수인계 시점에서는 2차 고정하중과 1/2활하중에 의한 처짐이 발생하기 전으로 잔류캠버량이 약 30.464mm가 발생하며, 궤도는 시공시 교량의 솟음 적용여부와 무관하게 궤도 안전성 확보를 위해 R.L을 수평으로 시공함에 따라 문제가 발생하였다. 즉, 솟음으로 인한 잔류캠버량이 30mm를 상회하므로 노반의 시공허용오차($\pm 20\text{mm}$)와 궤도 PCL층 허용오차($\pm 10\text{mm}$)를 고려하더라도 궤도 PCL층 최소두께(150mm) 확보가 불가능한 것이다. 문제 해결을 위해 PCL층을 교량면을 따라 일정한 두께로 시공하는 방법과 교량 자체의 높이를 필요한 만큼 낮춰 당초 계획한 레일면고(R.L)를 유지하면서 PCL층의 두께를 확보하는 방법, PCL층의 최소 두께를 줄이는 세가지 방법이 제시되었다. 제시된 방법 중 교량상 솟음의 모양대로 궤도 PCL층의 두께를 일정하게 유지하는 것은 시공이 곤란하고, 예상보다 작은 처짐이 발생할 경우 중앙부 레벨이 다른 지점에 비해 높아 열차 주행안전성에 불리할 수 있으며, 궤도틀림 등의 원인이 될 수 있다. 두번째 방법은 높이 조절이 가능한 교좌장치를 반영하여야 하며, 조절 능력 범위를 벗어나는 경우 문제 해결이 불가능하다. 마지막으로 PCL층의 최소두께는 궤도구조의 안전성과 시공성 등의 확보가 가능한 적정 범위 내에 있어야 하며, 기존 검토결과[5]에 따르면 130mm까지 두께 축소가 가능한 것으로 검토되었다. 그러나, 이 경우 역시 1/2 활하중에 의한 처짐량을 솟음에 반영할 경우 궤도/노반 인계인수 시점의 잔류 캠버량은 시공오차 범위($\pm 10\text{mm}$)를 감안한 PCL층 최소두께 기준을 만족시키지 못한다. 따라서, 궤도 PCL층 최소두께 확보를 통해 교량상 궤도구조의 안전성을 확보하기 위해서는 솟음량 산정을 위한 적용 하중을 재검토하는 것이 현재로서는 최선이라 판단된다.

2.2.2 설계 캠버량과 연직처짐 실측치 비교

1/2 활하중의 영향을 고려한 국내 고속철도 교량의 솟음량은 궤도 PCL층의 최소두께를 확보할 수 없어 교량-궤도의 시공성과 구조적 안전성에 불리하게 작용할 수 있으며, 이에 대한 근본적 해결을 위해서는 솟음량 산정을 위한 하중 적용기준의 재검토할 필요가 있다.

현재 호남고속철도 교량의 솟음에 반영된 1/2 활하중의 영향은 교량의 형식이나 경간에 따라 다르게 나타나겠지만, 1@40m PSC BOX 거더교에서는 5mm를 상회하며, 소수주형교의 경우 15mm를 상회한다. 이 활하중에 의한 처짐량이 적정한가에 대한 검토를 위해서는 운행선상에서 실측된 처짐량과의 비교가 필요하다.

경부고속철도는 교량의 동적거동 제한을 위해 대부분의 교량을 지간장 30m 이내의 PSC BOX 교량으로 시공하였으며, 열차 주행에 따른 연직처짐에 대해서는 많은 연구[6-10]를 통해 실측된 바 있으므로, 이 값과 호남고속철도 PSC BOX 거더교 설계 시 예측한 활하중에 의한 처짐과 솟음량을 실측치와 비교하였다.

Table 3 Comparison applied camber of bridges on Honam HSL with measured depletion of bridges on Gyeongbu HSL

구분	호남고속철도 교량에서의 활하중 솟음량 설계치 (적용하중 : 1/2 활하중)							경부고속철도 교량에서의 차량운행에 따른 처짐량 실측치 (적용하중 : 활하중 100%)					
	PSC BOX						소수주형	PSC BOX				강합성 플레이트	
경 간 (단위: m)	1@25	1@30	1@30	1@35	1@40	1@50	1@50	1@40	2@40	3@40	4@40	30+50+33	2@50
솟음 또는 처짐량 (단위 : mm)	0.830	1.728	1.667	2.922	5.343	6.750	17.894	1.450	1.091	0.839	0.815	1.290	1.680

Table3에서 보는 바와 같이 호남고속철도 교량 솟음량 산정 시 활하중의 영향을 50%만을 고려하였음에도 불구하고 PSC BOX(1@40m) 교량에서 약 5.343mm가 처지는 것으로 예측하였다. 그러나, 경부고속철도의 동일 형식 교량에서는 실제 활하중(100%)이 재하되었음에도 1.450mm가 처지는 것으로 나타나 예측치와 실측치간 큰 차이가 나타났다. 소수주형교, 아치교 등 특수교량에 대해서는 직접적인 비교검토가 불가능하나, 역시 활하중에 의한 처짐을 과다하게 반영하였을 것으로 판단되며, 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

3. 결론

철도교량의 거더에는 시공중이나 준공 이후 매우 크고 다양한 하중에 의해 연직처짐이 발생하며, 연직처짐은 열차의 주행안전성이나 승차감 등의 운행 한계조건을 판단하는 중요 인자이므로 솟음 적용을 통해 처짐이 안전측에서 유지될 수 있도록 할 필요가 있다.

그러나, 2011년 철도설계기준(노반편)이 개정되기 이전에 설계된 경부 및 호남고속철도 교량은 설계 시 고정하중(2차 고정하중 포함)과 1/2 활하중에 의한 처짐을 고려하여 솟음을 산정하여 콘크리트궤도구조의 안전성 확보에 불리하게 작용하고 있으며, 교량 설계 시 예측된 1/2 활하중의 영향은 실제 고속열차 주행시 실하중에 의해 발생하는 처짐량에 비해 과다하다.

따라서, 솟음량 산정을 위한 하중 조합의 재검토, 교량의 형식이나 지간, 교량 위에 부설되는 도상의 종류 등에 따른 솟음의 한계치 설정 등 교량-궤도간 상호 인터페이스 및 구조적 안전성 확보가 가능한 솟음량 산정기준이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] David T. Ricker (1989) Cambering Steel Beams, American Institute of Steel Construction, Engineering Journal, pp.138
- [2] Bruce A. Suprenant (1990) Construction of elevated concrete slabs, The Aberdeen Group, Understanding the effect of structural system
- [3] HSL Kyungbu Line - Bridge Design Manual 3.2.4(1995), SYSTRA
- [4] 호남고속철도 궤도 2 공구(익산~광주송정간) 궤도부설 기타공사 실시설계보고서(2012), 한국철도시설공단
- [5] 교량상 PCL 구조 안전성 확보를 위한 교량 캠버량 검토(2011), KRTC
- [6] 유현동 (2002) 고속철도 P.S.C. BOX GIRDER 교량의 동적거동 연구, 석사학위, 한양대학교 산업대학원
- [7] 강기동, 손기준 (2002) 고속철도 교량설계 기준에 대한 검증, 2002 년도 대한토목학회 학술발표회, pp.59-62
- [8] 나성훈, 양신추, 이지하, 손기준 (2003) KTX 시운전시 고속철도 교량의 성능검증, 한국철도학회 2003 년도 추계학술대회, pp.477-482
- [9] 서형렬, 한상철, 지기환 (2004) 상시 계측결과를 이용한 고속철도 교량의 유지관리 기준치 설정, 한국철도학회 2006 년도 추계학술대회, pp.13-18
- [10] 김성일, 이주범, 김현민, 이희업 (2011) 고속철도 교량의 속도별 주행시험을 통한 교량/열차 상호작용해석의 검증, 한국철도학회 2011년도 추계학술대회, pp.1555-1561