

장경간 청담대교에서 궤도의 변위와 구조물간의 상호작용에 관한 연구

A study on interaction of track displacement and structure on long span Cheongdam Bridge

김순철* 박석순** 이종득*** 강정욱**** 한광섭*****
Kim, Soon-Cheol Park, Seok-Soon Lee, Jong-Deuk Kang, Jeong-Ok Han, Kwang-Seob

ABSTRACT

Cheongdam Bridge in Seoul Metropolitan Subway Line No. 7 recently constructed has 180 meters (2@90m) of expansion length of structure (distance between fixed points). Track type is all ballasted track and rail expansion joint is installed at every movable point. However, there is no expansion joint at the transition area between ballasted track and deck. By this reason, the rail buckling has been occurred every year and there is actually an abnormal behavior in expansion.

In this study, based on the modeling of the Cheongdam Bridge, the element of interacting relationship between track and structure which is influential to track displacement in long-span bridge was analyzed and, finally, the methodology to ensure the continuous-welded rail in Cheongdam Bridge was suggested.

1. 서론

궤도에서 3대 취약개소중의 하나인 이음매를 제거하려는 노력은 레일용접기술의 발달을 가져왔으며, 이에 따라 최근의 철도건설에서는 이음매를 용접한 장대레일 궤도구조로 설계 및 시공하는 것을 기본으로 하고 있다. 그러나, 노반구조물의 형식은 온도변화영향이 없는 토공노반 뿐만 아니라 온도변화에 따라 구조물이 신축하여 궤도에 부가축력이 가해지는 교량형식도 있어 교량상 장대레일 궤도에서는 장대레일 안정성 확보를 위한 세심한 검토가 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 장경간 철도교에서 궤도/교량간 상호작용 영향요소중에서 궤도에 발생하는 부가축력에 영향을 주는 온도변화량과 구조물 신축길이 및 제동력의 영향을 살펴보고, 이를 바탕으로 최근에 건설되어 운영중인 청담대교에서 발생하고 있는 장대레일의 이상 신축거동에 대해 건설 후 현재까지 조사된 궤도변위 및 유지보수관련 자료들을 바탕으로 현상을 파악하고 이를 이론적으로 재조명하여 청담대교와 같은 장경간 교량에서 궤도변위를 일으키는 궤도/교량간의 상호작용 영향요소를 보다 명확히 규명함은 물론, 장대레일 안정화를 위해 레일신축이음장치를 재배치하여 그 때의 이론적으로 산출된 추정 궤도변위량과 실제 시공후 실측된 궤도변위량을 비교 분석함으로써 청담대교에서 장대레일의 안정성을 향상시키기 위한 효과적인 방안을 제시하고자 한다.

- * (주)석탑엔지니어링 궤도부 상무, 공학석사, 정회원
- ** 서울도시철도공사 팀장, 정회원
- *** (주)석탑엔지니어링 부회장, 공학박사, 정회원
- **** (주)석탑엔지니어링 궤도부 과장, 비회원
- ***** (주)석탑엔지니어링 궤도부 사원, 공학석사, 비회원

2. 교량상 장대레일의 기본이론

2.1 궤도와 교량간 상호작용관계

장대레일하의 교량이란 장대레일 궤도가 변형과 이동에 대하여 외형상 안정된 상태를 의미한다. 궤도와 교량은 이동할 수 있고, 어떤 힘이나 변위는 다른 곳에 그 힘이 작용될 것이다. 따라서, 궤도와 교량간의 상호작용관계는 다음과 같다.

- 장대레일에 작용하는 힘은 궤도 또는 교량 지지점에 부가적인 힘으로 작용하거나 궤도와 슬래브를 이동시킨다.
- 슬래브의 이동은 궤도 이동을 유발하고 궤도와 교량 지지점에 간접적으로 부가적인 힘을 준다.

이와 같이, 장대레일궤도는 레일이음매를 없애므로서 레일 이음부에서의 손상을 최소화 할 수 있으나, 레일이 장대화 됨에 따라 온도변화 및 외력에 의해 레일에 과도한 상대변위 및 축력이 발생할 우려가 있다.

특히 교량상의 장대레일에서는 교량과 레일간의 물성 차이로 인해 상대변위가 커지고 교량의 거동에 의해 레일에 부가축력이 가해져 심할 경우에는 레일 좌굴이나 파단을 일으킬 수도 있다. 여러 연구결과에 따르면 교량구간에서의 레일축력은 도상의 저항력 및 교량의 신축길이, 지점배치, 하부구조강성 등의 영향을 받게 됨이 밝혀졌으며, 이러한 궤도/교량간의 상호작용에는 도상의 비선형적 거동이 가장 중요한 매개변수로 작용하는 것으로 알려지고 있다.

그림2는 UIC Code 774-3R에서 규정하고 있는 도상의 변위-저항력 관계곡선이다. 이 관계곡선으로부터 궤도의 종저항력은 도상의 다짐 상태뿐만 아니라 수직하중의 적하 여부에 따라 다른 거동을 보임을 알 수 있다. 즉, 도상의 종저항력이 증가할수록 교량의 거동에 의한 부가적인 레일축력이 발생할 가능성이 크며 레일의 축력이 교량으로 전달되는 비중도 커진다. 반면에, 도상저항력이 감소하면 교량의 거동에 의한 부가적인 레일축력의 발생은 감소하지만 레일축력 분배효과가 떨어져, 축력의 대부분을 레일이 부담해야 하므로 시동/제동하중 작용시 레일의 좌굴 또는 파단이 발생할 수 있다.

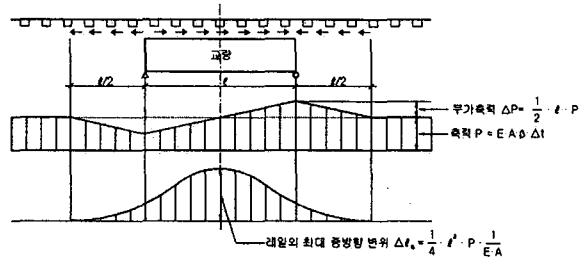


그림1. 온도상승으로 인한 교량상 장대레일의 축력과 변위

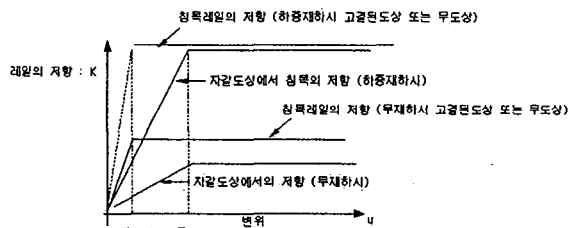


그림2. 궤도저항계수 k와 레일의 종방향 변위 u와의 관계

2.2 궤도/교량간 상호작용 영향요소

궤도/교량간 상호작용관계에 있어 각 영향요소들의 영향범위를 알아보기 위해 철도교를 표1과 같은 물성으로 가정하여 영향요소의 크기를 변화시켜가며 축력과 변위량의 변화를 알아보았다. 해석에 사용된 프로그램은 ERRI가 개발한 CWERRI로서 장대레일 축력해석 전용 프로그램이다.

표1. 모델링을 위한 궤도/교량의 물성 및 조건

궤도	교량
$A = 0.015488\text{m}^2$ (KS60rail $\times 2$)	$A = 1.137\text{m}^2$
$E = 2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$	$E = 2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$
$\alpha = 1.14 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$\Delta T = -45^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$	$\Delta T = -35^\circ\text{C} \sim +30^\circ\text{C}$
$r = 12\text{kN/m/t track}$, $u_0 = 2\text{mm}$	교각 강성 100,000kN/m

2.2.1 온도변화에 의한 영향

일반적으로 온도변화량의 크기에 따라 레일축력은 비례하게 되며, 교량구간은 구조물 신축방향에 따라 부가축력이 궤도에 압축 또는 인장으로 가해지게 된다. 또한 레일과 교량의 온도변화량이 다를 경우와 동일할 경우 레일축력은 다르게 나타난다. 예를 들어 다음 표2와 같은 모델에서 온도변화량을 레일 -45℃, 교량 -35℃라 할 때는 이동지점에서의 최대축력이 2,099kN/궤도 인데 비해 레일과 교량의 온도변화량이 -35℃로 동일할 경우에는 이동지점에서의 최대축력은 1,728kN/궤도로서 약 371kN/궤도 정도 줄어들게 되는데 이것이 궤도와 교량간 온도차이 10℃의 영향력이다.

표2. 온도변화에 의한 축력 비교

해석 교량 모델	온도변화량 : 레일 -45℃, 교량 -35℃	온도변화량 : 레일 -35℃, 교량 -35℃
	최대축력 : 2,099kN/궤도	최대축력 : 1,728kN/궤도

2.2.2 구조물 신축길이에 의한 영향

전항의 조건에서 구조물 신축길이(고정점간 거리)를 표3과 같이 변화시켰을 경우에는 신축길이에 비례하여 축력이 증가하는 것을 알 수 있다. 신축길이 20m당 약 100kN의 변화를 보이고 있다

표3. 구조물 신축길이에 의한 축력 비교

구조물 신축길이 : 60m	구조물 신축길이 : 80m	구조물 신축길이 : 100m
최대축력 : 1,995kN/궤도	최대축력 : 2,099kN/궤도	최대축력 : 2,199kN/궤도

2.2.3 제동력에 의한 영향

제동력은 그 작용방향에 따라 레일에 미치는 영향이 상반되게 나타난다. 다음 표는 제동력을 작용시켰을 경우의 레일과 구조물 변위 및 이동지점에서의 최대축력을 계산한 값으로, 모델화 된 교량에서 제동력의 영향은 레일이동방향과 제동력 작용방향이 같을 경우와 다를 경우 제동력의 크기에 따라서는 레일변위량이 최소5mm 최대10mm 정도 달리 나타나나 구조물에는 거의 영향을 주지 않는다. 즉, 제동력은 레일변위에 다소의 영향을 주게되나 구조물 변위에는 거의 영향이 없어 온도변화량에 의한 변화량을 고려할 경우 무시해도 무방함을 알 수 있다. 또한 이동지점에서의 축력의 변화량도 제동력 작용방향에 따라서는 유리하게 작용하기도 하고 불리하게 작용하기도 하여 설계 시 최대축력을 고려할 경우에는 제동력 작용방향에 대해 주의가 필요하다.

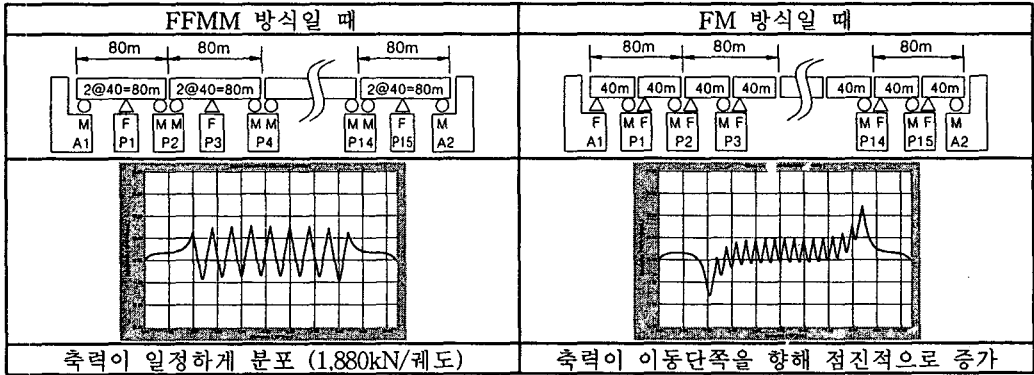
표4. 제동력 작용방향과 제동력 크기에 따른 비교

	제동력 작용방향 (→)			제동력 작용방향 (←)		
	제동력	8kN	20kN	제동력	8kN	20kN
레일변위 (mm)	-1.08	2.39	레일변위 (mm)	-6.68	-12.08	
구조물변위 (mm)	-32.10	-32.10	구조물변위 (mm)	-32.11	-32.17	
축력 (kN/궤도)	1,816	1,345	축력 (kN/궤도)	2,328	2,593	

2.2.4 지점배치 방식에 의한 영향

다음 표5와 같이 2@40m 연속보를 FFMM 방식으로 배치하였을 경우와 경간 40m 단순보를 FM 방식으로 배치하였을 경우 축력의 변화량을 알아보면 FFMM 방식인 경우 교량 전장에 걸쳐 축력이 일정하게 분포하게 되나, FM 방식의 경우 점차 누적 증가되어 교량 종점부에서 급속히 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 장대교량을 설계할 경우에는 고정점간 거리를 일정하게 제한하여 FFMM 방식으로 설계하는 것이 궤도측면에서 축력 증가억제에 유리해져 레일신축이음이 불필요해진다.

표5. 지점배치방식에 따른 축력 분포



3. 청담대교의 장대레일 관리 현황과 문제점

서울도시철도 7호선 청담대교 구간에 대한 장대레일 관리상의 문제점은 레일의 변위가 설계당시 예상했던 것 보다 크게 나타나고 있고, 신축방향도 불규칙할 뿐만 아니라 도상이완과 좌굴발생 등 장대레일 궤도로서는 매우 불안정한 상태를 보이고 있어 유지관리보수에 많은 어려움을 겪고 있으며, 아직 근본적인 대책이 마련되고 있지 않다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해소할 목적으로 전항에서 검토한 궤도변위에 영향을 주는 궤도/교량간 상호작용 영향요소를 감안하여 장대레일 기본이론을 바탕으로 안정된 선로유지방안을 제시하고자 한다.

3.1 청담대교 시설물 현황

청담대교 구간 중 문제가 되는 구간은 독섬유원지역에서 청담역 쪽 한강을 건너는 자갈도상구간으로 시설개요는 다음 그림과 같다.

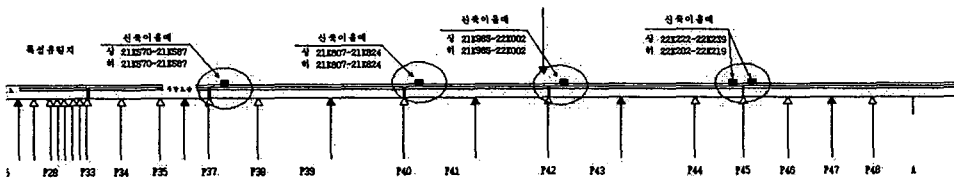
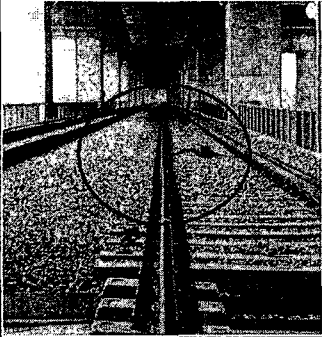


그림3. 청담대교 시설물 현황 개요도

본 구간의 궤도구조는 60kg 레일, PC침목(16개/10m), 자갈도상(두께 30cm)구조이며 도상밑에는 바ラスト매트가 설치되어 있다. 또한, 상기 그림과 같이 이동지점마다 레일 신축이음매를 설치하였으나 콘크리트도상과 자갈도상 경계부인 정거장 종점부 이동지점에는 설치하지 않았다. 경간장은 대부분 90m이며 고정지점간 거리는 최소 180m로 구성되어 있다.

3.2 청담대교 궤도유지관리 현황

3.2.1 고가 교량 접속부 레일 좌굴 발생

	발생 현황
	○ 구간 : 퉁섬유원지~청담 ○ 위치 : 21k395~21k405 (하선) ○ 일시 : 1차 '01. 6월, 2차 '02. 6월
	발생 원인
	고가부 콘크리트도상과 자갈도상 경계부의 이동지점에서 구조물 신축에 의한 압축력이 집중될 것으로 예상되나 레일 신축을 흡수할 레일신축이음장치가 없기 때문에 좌굴이 발생하는 것으로 추정됨
	유지 보수 내용
	○ 1차 좌굴 발생시에는 장대레일 재설정 및 체결구를 e2007을 e2001로 교체하여 체결력을 완화하였음 ○ 2차 좌굴 발생시에는 레일을 교환하였음

3.2.2 자갈도상 이완 및 레일신축 과다 발생

한강통과 구간 전 연장에 걸쳐 자갈도상 이완이 발생하고 레일신축 이음매에서는 신축량이 과다하게 발생하고 있으며, 이에 대한 조치로 보통체결구를 종방향 활동 체결구로 교체하거나 신축이음매에는 코일스프링 체결구를 볼트크립 체결구로 교체하여 체결력 완화로 자갈도상이완을 예방하였다.

현장에서 측정된 자료에 의하면 구조물 온도와 레일온도는 대기온도와 비슷하여 레일과 교량의 온도변화량은 모두 -35℃와 +10℃ 정도에 불과하면서도 레일 신축량은 70mm~90mm 정도로 크게 발생하고 있어 레일신축이음매의 스트로크 증가가 요구된다.

종방향활동체결구(左)와 일반체결구(右)		
구 격	e2071	e2007(e2001)
체결력	0(zero)톤	약 1.4톤(0.9톤)
형 상		

3.2 청담대교 궤도변위와 축력해석

청담대교에서 발생할 것으로 예상되는 이론적인 궤도축력과 변위량을 조사하기 위해 실측된 온도변화량을 적용하여 해석한 결과는 다음 표6와 같다.

표6. 실제 온도변화량을 적용한 이론적인 궤도축력과 변위량

신축이음위치 구 분	동 절 기				하 절 기				비 고
	P37	P40	P42	P45	P37	P40	P42	P45	
레일 상대변위 (mm)	75.80	74.50	74.48	87.82	23.73	21.27	21.29	17.41	신축이음 有
구조물변위 (mm)	60.96	37.02	37.01	64.68	24.12	21.54	21.55	16.09	
축력 (kN/궤도)	1,455	1,514	1,510	2,432	-711	-629	-641	-580	신축이음 無

상기 결과는 실측 자료와 유사하게 일치하고 있으며, 다음과 같은 원인을 도출하게 한다.

- 레일의 신축방향이 편중되고 있는 것은 신축이음매간 길이가 너무 짧아 부동구간이 존재하지 않는 관계로 장대레일로서 기능을 갖지 못하여 불안정하게 거동하기 때문이다.
- 온도변화량이 작아도 신축량이 큰 것은 구조물 신축길이가 너무 길어 부가축력이 커지기 때문이며, 좌굴발생 원인은 레일축력은 작으나 레일 변위량이 크기 때문이다.

4. 청담대교 장대레일 안정화 방안

청담대교상의 장대레일을 안정화시키는 방안으로 우선 고려해 볼 수 있는 것은 신축이음매간 거리를 현재보다 길게 하여 장대레일 중앙에 부동구간이 생기도록 하는 것이다. 그러기 위해서는 현재의 신축이음설치 개소를 줄여야 하나 레일 신축량이 증가될 것이므로 스트로크가 현재보다 큰 신축이음매장치가 필요해진다. 또한, 신축이음이 놓였던 구간은 축력이 커지는 이동지점이기 때문에 축력 해소를 위해 신축이음장치 역할을 대신할 종방향활동체결구의 설치가 필요해진다. 그 외 매년 레일좌굴이 발생하는 개소의 이동지점 부근에는 레일신축이음매의 추가 설치가 필요해진다. 이와 같은 방안으로 다음과 같이 신축이음설치 위치를 재배치하여 궤도의 변위와 축력 등을 해석하였다.

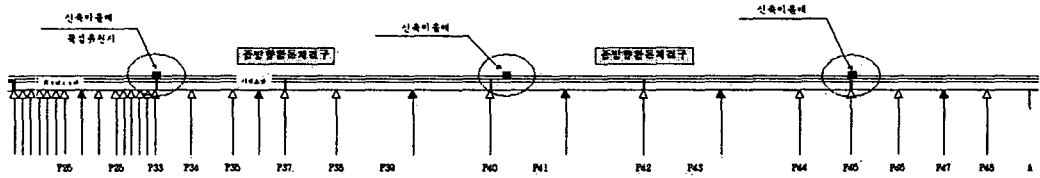


그림4. 청담대교 장대레일 안정화를 위한 레일신축이음장치 재배치 방안

표7. 청담대교 장대레일 안정화 이후 레일의 축력 및 변위 해석결과

종방향활동체결구 설치위치에서의 축력 (kN/궤도)		신축이음매 설치위치에서의 변위 (mm)		
동절기	하절기	동절기	하절기	
560	720	-540	-480	
		70.37	141.44	129.75
		30.56	43.22	16.91

상기 해석결과에 의하면, 당초 신축이음이 부설되었던 구간에 종방향활동체결구를 설치한 결과, 최대축력이 동절기 720kN/궤도, 하절기 -540kN/궤도로 통상적인 값보다 현저히 작아 장대레일의 안정화를 기대할 수 있으나, 레일변위는 종전보다 증가(87.82mm→141.44mm)하여 신축이음매 스트로크 증대가 필요하다고 판단된다.

5. 결론

청담대교에서 장대레일 안정화를 위한 방안을 제시하기 위해 장경간 교량에 대한 궤도변위와 궤도/교량간 상호작용 영향요소 등에 대해 살펴보았으며, 레일신축이음 재배치 방안을 제시하였다. 제시된 방안에 따라 현장 시공후 장기간에 걸쳐 지속적으로 계측 관리하여 실제에 가까운 이론정립과 함께 향후 유사 상황에 대처하는데 도움이 되도록 할 것이다.

참고문헌

1. UIC(2001), "Track/bridge Interaction Recommendations for calculations", UIC Code 774-3R.
2. 佐藤吉彦 梅原利之 共編(1987), "線路工學", 日本鐵道施設協會.
3. L. FRYBA, Thomas Telford, "Dynamics of Railway Bridges".
4. 金舜喆(2003), "長大橋梁에서 軌道와 構造物의 相互作用에 關한 研究", 서울産業大學敎 鐵道專門大學院 工學碩士 學位論文.
5. 李種得(2000), "鐵道軌道力學", 盧海出版社.