

경계조건에 따른 판형교 장대레일의 거동 특성

The characteristics of the behaviour of plate girder bridges according to the boundary conditions.

민 경 주*
Min, Kyung-Ju

정 의 하**
Jung, Ue Ha

김 영 국***
Kim, Young-Kook

ABSTRACT

The CWR of the plate girder bridges in non-ballast causes the additional axial force on the rail and the bearing due to the temperature axial force and the interaction between the CWR and bridges. This study shows the remarkable improvement of reducing the axial force of the CWR on the non-ballast bridge, compared to conventional methods. New method, which is differently designed in terms of longitudinal semi-rigid bearing, reduces the axial force on the bearing by making the girder act both directions. This method is applicable to most cases of bridges regardless of the restriction of length, and useful to reduce the abrasion and damage of the track material.

1. 서 론

철도 궤도에서 레일의 장대화는 유지관리비의 절감은 물론 소음·진동의 획기적 감소와 열차 속도 향상 및 승차감 향상에 크게 기여한다. 그러나 취약 궤도구조인 급곡선부, 분기기 및 25m 이상 판형교량상의 레일 장대화는 하절기 온도 상승에 따른 레일 압축력의 증가로 인한 궤도의 좌굴 위험성과 동절기 온도하강에 따른 레일 인장력으로 레일용접부에서 절손 위험을 증가시키며 특히 궤도의 좌굴은 열차 탈선등 대형 사고를 유발시킬 위험이 있다.

이들에 대한 꾸준한 선로 기술축적과 연구결과들로부터 급곡선부 및 분기기들에 대해서는 기술적으로나 궤도의 안정성 측면에서나 장대화 시공에 큰 문제가 없는 것으로 나타났으며 실제 시공되고 있는 실정이다.

반면, 판형교량상 레일 장대화는 앞에서의 온도 변화에 따른 레일의 축력에 판형교량 거더의 신축으로 인한 추가 축력이 작용되어 레일 축력은 더욱 증가되게 되고 이는 판형교량상 무도상 궤도의 좌굴안정성 저해는 물론 거더의 신축에 따른 레일 체결구, 레일패드, 타이플레이트, 침목고

* 철도안전연구소, 정회원

** 철도청 토목시설과장, 정회원

*** 철도청 동해시설관리소장, 정회원

정장치 및 침목 등의 손상을 촉진시키게 된다. 특히, 부동의 장대레일과 거더의 온도신축에 의한 상호작용은 결국 종방향력을 발생시켜 이를 교좌장치를 통하여 교량 하부구조에 전달되게 된다.

이때 교좌장치에는 큰 종하중이 작용하게 되며, 판형교 고정하중에 비하여 아주 큰 주행열차 하중에 의한 진동 및 충격하중으로 인하여 교좌장치 및 보자리 손상을 촉진시키며 교각의 안정성을 저해시킬 우려가 있다. 이는 연구결과(판형교량상 레일 장대화 방안 연구/한국철도 기술연구원/2000.12)에서도 지적된 바 있으며, 이러한 이유로 판형교량상 장대화가 시행되지 못하고 있었다. 또한 연구결과에 의하면 종방향 저항력은 물론 거더의 들림 방지 장치 등도 필요한 것으로 보고되고 있으나 현재 판형교 교좌장치는 이들에 대한 기능이 없거나 안전성이 부족한 실정이다. 따라서 판형교량의 충격 및 진동을 감소시키고 장대레일 축력을 감소시킬 수 있다면 레일과 교량의 안전성은 물론 효율적인 유지관리가 가능하게 될 것이다.

판형교량에 설치되어 있는 교좌장치는 주로 선반침 또는 면반침이다. 이들은 교좌장치의 초기형태로 주로 상부의 수직하중을 교량 하부구조에 전달해주는 기능을 하며 최소의 구속조건 즉 횡방향 구속과 교량의 안정성 확보를 위한 고정단(힌지단) 및 가동단의 기능은 가지고 있으나 부반력에 대한 기능이 없다. 가끔 홍수시 판형교 거더의 유실은 부반력의 부재에서 오는 경우가 대부분이다.

판형교량은 상부구조의 전체 하중이 5ton~30ton 정도로 경량구조이나 상재 활하중인 열차하중은 132ton으로 10배정도의 하중이 통과하며 열차의 충격과 진동을 수반하게되어 판형교량의 거동은 아주 복잡하게되고 이에 따른 교좌장치와 보자리의 신속한 손상으로 잦은 보자리 보수로 인하여 유지관리에 많은 어려움을 겪고 있다.

판형교량의 교좌장치는 4점지지로 되어 있으나 경량이면서 강성이 강한 상부 구조로서 3점지지가 되는 경우가 많으며 열차 충격에 의한 보자리가 손상되는 경우에는 이를 가속화 시킨다. 이 경우 열차의 사행동을 증가시키게 되어 승차감이 현저히 감소되며 수직 진동과 함께 열차의 주행 안전성을 감소시켜 판형교 주행시 기관사들이 속도를 조절하는 등의 조치를 취하는 경우도 있다.

이들 문제를 쉽게 해소하는 방법이 교량상 레일 장대화이다. 그러나 레일 장대화는 다음과 같은 문제점이 있다. 즉, 레일 장대화는 순수한 레일의 온도변화에 따른 레일당 최대 축력이 $\pm 70\text{ton}$ 을 상회하게 된다. 이러한 축력에 기존의 교좌장치는 거더의 온도신축으로 인하여 레일에 발생시키는 추가 축력이 약 최대 $\pm 30\text{ton}$ 정도를 발생시켜 레일의 축력을 크게 증가시키게 된다. 이는 판형교 거더의 길이와 경간 수 등에 따라 다르게 나타나고, 교량길이가 긴 판형교량에서는 더욱 문제를 발생시키게 되며, 레일과 침목의 체결 상태 및 침목과 거더의 고정 상태에 따라서는 이보다 훨씬 큰 응력을 발생시킬 수도 있다. 이는 궤도의 좌굴 위험성을 증가시켜 교량의 안정성을 저하시키고 열차의 안전운행을 위협하게 되며, 레일패드와 마모, 레일 체결구 등 궤도재료의 손상을 촉진시키게 된다.

이러한 거더에 의한 레일 축력의 증가는 교좌장치에서는 종방향 반력으로 작용되게 된다. 레일 장대화가 되지 않았을 때 이들 레일에 의한 종방향력은 아주 미소하여 설계상 무시하여도 되나 장대화후에는 종방향력 외에도 열차의 제동·시동 하중 및 기관차의 견인력 등도 종방향력으로 작용되게 되어 교좌장치 및 보자리를 손상시키고 교량의 안전성을 저해시키게 된다. 현재의 교좌장치 고정용 양카볼트는 이들 하중에 저항할 수 있도록 설계되어 있지 않은 실정이다.

더욱이 위의 종방향력에 열차의 수직하중은 교좌장치 저판에 편심하중으로 작용되어 응력 집중으로 인한 교좌장치의 손상이 신속하게 진행되게 된다. 이는 판형교의 레일장대화 시험 부설된 교량에서, 열차가 운행되지 않는 교량의 교좌장치는 손상이 되지 않은 반면 열차 운행 빈도가 높은 교좌장치의 손상이 신속하게 진행된 사례에서는 쉽게 알 수 있다.

특히 판형교량상 레일 장대화는 온도상승에 따른 레일 축력의 증가로 궤도의 횡 좌굴은 물론

상향력도 발생될 수 있으나 현재의 판형교량 교좌장치는 이에 대한 저항력이 없다. 이는 축력이 크게 발생하는 지점부에서 레일이 절손될 경우 거더의 들림과 횡방향 편심력으로 인한 거더의 이탈 가능성도 있으며 이 경우 열차의 낙교 등의 대형 사고 위험성도 있다.

본 연구에서는 철도 판형교량 상부 궤도의 레일 장대화에 따른 교량상 장대레일의 축력 증가를 감소시키고 특히 교좌장치 및 교각에 발생하는 종방향력을 감소시켜 판형교량 레일 장화에 유용하게 활용할 수 있는 반고정식 교좌장치(축력/진동저감형 교좌장치)를 적용시키고 이를 기존 교좌장치와 비교분석하였다. 이 교좌장치를 사용한 판형교량상 레일 장대화 시스템은 레일에 추가되는 축력과 교좌장치에 발생하는 종하중을 현저히 감소 시키며, 교량의 길이에 관계없이 판형교량상 레일 장대화를 가능하게 한다. 이 교좌장치 시스템을 적용시키면 진동저감, 충격흡수 성능도 크게 향상시킬 수 있고, 교좌장치의 유지관리 노력의 절감은 물론 궤도의 효율적인 유지관리에도 기여할 것으로 판단된다.

2. 장대레일과 판형교의 상호작용

철도 판형교상의 레일을 장대화시켰을 때, 미소한 교각 거동을 무시한다면, 판형 거더 각각은 독립적으로 거동하며 실제 구조해석도 이러한 논리에 의하여 가정하고 해석한다.

그러나, 거더 상부 레일을 장대화하여 연결시키게 되면 판형교량은 비록 강성이 작기는 하나 레일에 의하여 연속구조가 되며 실제적인 구조적 거동도 이에 따른다. 즉 레일 장대화시 교량의 수직거동에 대한 강성이 약 10% 내외 증가되며, 특히 종하중에 대하여는 1개 레일의 단면적이 77.4 cm²로 거더의 단면적(약200cm²~500cm²)에 비하여 약 15%~40% 정도로서 일종의 축력 성분인 종방향 거동에 영향을 미칠 수 밖에 없을 것이다. 이는 온도 상승시 신축이 제한되는 부동구간(레일신축이음부가 교대에서 100m 이상 떨어진 곳에 설치한 경우)인 판형교량상의 장대레일과 판형교 거더의 교좌장치 가동단의 자유로운 온도신축 사이에 거더와 장대레일의 연결장치(레일체결구 및 침목고정장치)를 매개로 상호작용력이 발생하게 된다. 이 상호작용력은 레일에 축력을 증가시키게 되고 교좌장치에는 종방향력을 발생시키게 된다.

이들 레일 축력 증가와 교좌장치의 종방향력 증가는 판형교량 레일 장대화시 많은 장점에도 불구하고 레일 장대화를 실시하지 못하는 이유였다. 이를 해결하는 방법으로 거더와 레일의 마찰력을 저감시켜 이들을 완화시키는 방법도 있으나 이는 구조적으로 안정성이 저하되며, 궤도재료의 손상 촉진 및 동절기 레일 절손시 개구량이 증가되는 위험이 있다. 근본적으로 교좌장치의 안전성이 확보되지 못하고 있다.

판형교 교좌장치의 고정단은 이론적인 것과는 다르게 시공을 위하여 어느 정도 유격을 두게 되나 실제 판형교량에 설치되어 있는 교좌장치의 고정단은 사실상 상당한 유격(일반적으로 2~5mm 정도)이 존재하고 있으며 이곳에서의 거더 변위도 1~2mm 정도로 나타나고 있다.

이러한 점에 착안하여 교좌장치의 고정단과 가동단 개념에서 탈피하여 종방향의 일정 범위까지는 변위를 탄성적으로 쉽게 이동할 수 있게 하고 일정 변위 이상은 제한 하게되면 교량의 안정성을 확보할 수 있을 것이다. 이는 거더의 중심에서 양방향으로 온도신축이 이뤄지므로 기존 교좌장치 보다 레일 축력을 현저히 감소시키며, 거더수가 증가됨에 따라 레일 축력의 증가도 증가되는 기존의 교좌장치의 기능과 다르게 거더수가 증가하여도 레일 축력의 증가는 일정한 성능을 나타내고 있다. 또한 교좌장치에 발생하는 종하중을 현저히 감소시켜주게 된다.

교각에 있는 전후 거더의 교좌장치에 발생하는 온도 종하중은 거더의 길이가 같은 경우 크기가 같고 방향이 반대이므로 교각에는 거의 종하중을 발생시키지 않게 되어 교각의 안정성도 향상시

킬 수 있는 구조이다. 거더의 양쪽 교좌장치가 일정 탄성 변위 후에는 고정되므로 내진 흡수력이 있으며 한 쪽 교좌장치의 기능이 상실되어도 구조적으로 불안정한 구조가 되지 않는다.

(1) 교량과 장대레일의 상호작용

일반적인 철도 판형교량의 주하중은 고정하중과 열차하중이다. 상부 레일이 장대화되면 단순지지 구조인 판형거더를 상부에서 연결된 레일로 일종의 연속구조형식이 되나, 레일의 휨강성이 거더의 휨 강성 등은 현저히 작으므로 연속 구조물로 고려하기에는 연속의 경계조건 등을 고려할 때 무리가 있다.

그러나 교량 종방향 하중에 대한 역학적 거동은 레일도 상당한 종방향력에 저항할 수 있으므로 연속구조물로 해석하여야 한다. 이들 판형교량의 하중전달 체계도를 레일장대화 전후로 나누어 나타낸 것이 아래 그림이다.

그림 1에서 레일 장대화 전에는 교좌장치에 종방향력이 거의 작용하지 않고 상부 고정하중과 열차하중이 작용되게 된다. 그러나 그림 오른쪽과 같이 레일이 장대화되면 장대화 전의 하중에 레일의 온도 축력이 최대 100ton정도 작용하게 되고 교좌장치에도 거더의 길이에 비례하여 약 1ton/lm의 종하중이 작용하게 된다. 거더의 길이가 20m인 경우 거더의 온도신축에 의한 종방향력은 약 20ton이 작용되게 되며 교각에는 모두 40ton의 종방향력이 작용되게 된다.

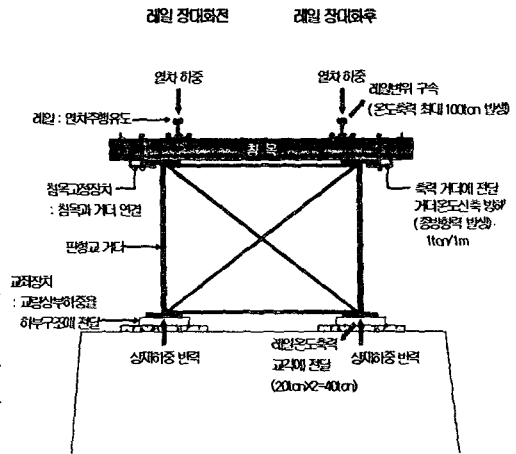


그림 1 판형교 하중전달 체계도

(2) 장대레일과 판형교의 상호작용

기존의 교좌장치에 레일장대화가 되면 가운데 그림과 같이 활동단 부에 축력이 집중하게 되고 경간수가 많은 경우 교대부에서는 응력집중이 더욱 증가되게 되며 교좌장치의 종저항력도 증가되게 된다.

그러나, 축력/진동저감형 교좌장치를 설치한 경우에 장대레일과 거더의 거동은 하단 그림과 같이 거더 자체 평형을 이루므로 교각에 종하중을 거의 발생시키지 않으며, 레일 축력의 증가도 미소하고 특히 거더수에 따라 축력이 증가되는 현상이 나타나지 않으므로 교량의 길이에 관계없이 적용가능하며, 기존 교량 중간에 레일 신축이음 등을 둘 필요가 없다.

(3) 축력/진동 저감 교좌장치의 기능

축력진동저감형 교좌장치는 그림 2에서 보는바와 같이 양방향으로 일정 범위를 탄성적으로 이동할 수 있게 하여 거더의 온도신축을 양방향으로 분산시키는 효과가 있으며 이를 기존의 교좌장치와 비교고찰하고자 한다. 또한 철도 판형교량의 충격을 저감시키기 위하여 고무

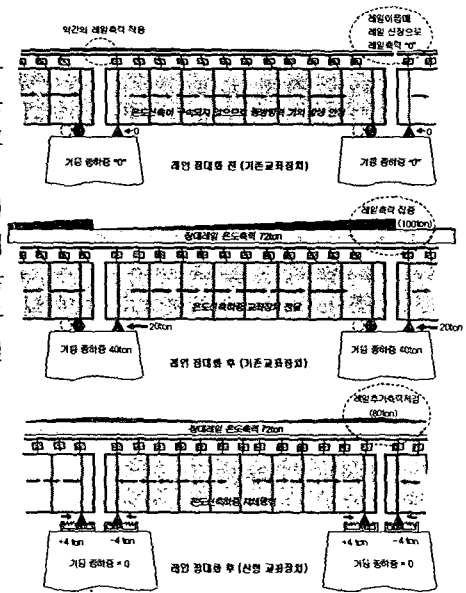


그림 2 장대레일과 경계조건에 따른 거동비교

베어링을 삽입하였으나 이는 본 연구의 연구 대상이 아니므로 진동저감에 대해서는 고찰하지 않으며 외형은 다음 그림 3, 4와 같다.

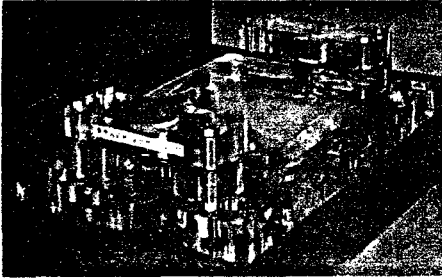


그림 3 교좌장치 모형

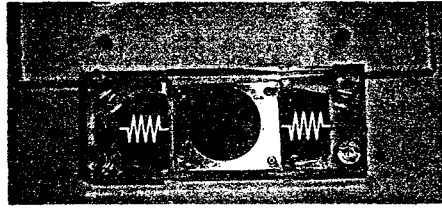


그림 4 종방향 변위 흡수 개념도

3. 경계조건에 따른 판형교 장대레일 해석

(1) 교량의 장대레일 축력

유도상 교량의 경우에는 300mm 두께 정도의 도상자갈층 및 도상자갈 하면과 교량 바닥면의 접측면에 있어서 마찰력을 통하여 레일과 거더간에 힘이 전달되므로 서로의 영향이 판형교량에 비하여 낮게 나타난다.

무도상 판형교량상 장대레일과 교량 구조물 사이에 작용하는 힘의 전달경로는 그림 1에서 보는 바와 같이 레일-레일체결시스템-교량침목-거더-교좌장치-교각 및 하부구조 전달되며, 거더의 온도 신축으로 인한 영향이 장대레일에 미치게 되며, 이때 체결력 및 마찰력의 크기에 따라 레일 축력에 영향을 미치게 된다.

(2) 교량의 장대레일축력 해석 방법

장대레일의 안정성해석을 위하여 궤도의 재료 특성치를 사용할때와 교량의 안정성해석을 위하여 사용하는 궤도재료 특성치는 이들의 해석상 저항측면에서 적용시키느냐 아니면 작용외력의 측면에서 사용하느냐에 따라 그 특성치의 적용을 다르게 해야 할 것이다. 즉 궤도의 안정해석을 위해서는 구조물의 저항으로 작용하는 도상저항력을 안전치 즉 낮은 값을 사용하여야 하나, 교량의 안정해석을 위해서는 이들 저항력이 외력 발생기구가 되므로 실제 저항력을 사용하여야 안정해석의 신뢰성을 높일 것으로 판단되므로 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 궤도재료의 특성치를 사용하였다. 이들 특성치들은 이에 대한 광범위한 실험 등을 통하여 얻은 문헌[1]을 참고하였다.

수치해석은 구조물의 기하학적 비선형과 궤도 재료의 비선형 거동특성을 고려하여 레일과 교량 구조물의 상호작용 해석을 수행하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 상용프로그램으로써 널리 알려진 ABAQUS를 사용하였으며, 문헌[5]의 해석자료를 사용하였다.

우리나라 교량상의 주변환경과 기존의 계측결과를 토대로 교량상 레일과 도상구간의 레일 및 거더온도의 변화량을 달리하여 해석을 수행하였다. 또한 장대레일의 부동구간을 고려하기 위하여 그림 6과 같이 교량 시중점부로부터 도상구간을 100m씩 설정하였다. 온도 설정은 설정온도 20℃에 변화량은 ±40℃로 하였으며 기타 재료들의 물성치들은 기존의 철도청 및 철도기술연구원 연구결과들[1]을 적용하였다.

(3) 해석 모델링

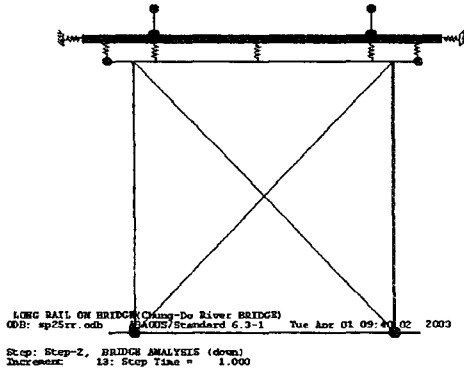


그림 5 해석모델링 (Spring)

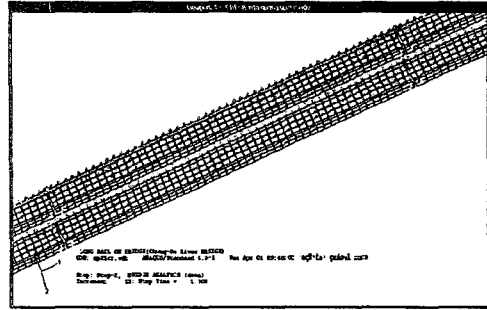


그림 6 해석모델 (3D)

(4) 교량의 장대레일 축력 해석

레일과 거더의 중저항력을 변화시키면서 레일축력과 교좌장치에 작용되는 중방항력을 나타낸 것이 그림 7과 그림 9이다.

그림 8, 그림 10, 그림 11, 표 1은 온도 변화에 따른 기존교좌장치와 축력/진동저감형교좌장치 설치에 따른 교량상부 레일의 축력을 나타낸 것이다.

그림에서 보는바와 같이 기존교좌장치는 거더의 증가 및 레일패드의 마찰저항의 증감에 따라 축력의 변화가 크고 최대치가 크게 증가됨을 알 수 있다. 그러나 축력/진동 저감형 교좌장치는 거더의 수와 관계없이 축력의 증감률이 낮으며 절대 크기 또한 낮음을 알 수 있다. 이는 교량의 길이가 증가되면 축력의 증가로 인하여 레일 장대화에 불리하였던 기존의 단점을 해결한 것이다.

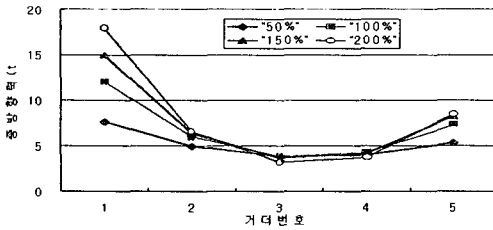


그림 7 교좌장치 중방항력(기존교좌장치)

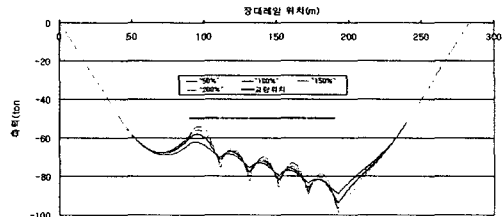


그림 8 교량상 장대레일축력(기존교좌장치)

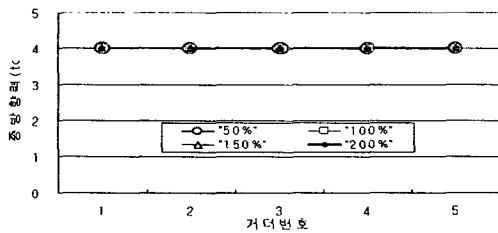


그림 9 교좌장치 중방항력(축력/진동 저감형)

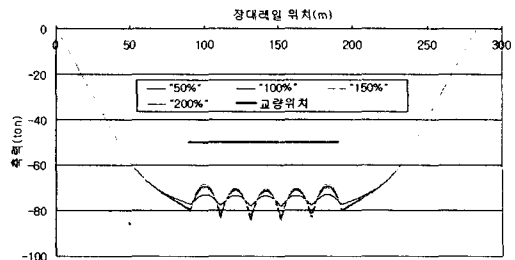


그림 10 교량상장대레일축력(축력/진동저감형)

표 1 경제조건에 따른 축력 비교

구 분	레일과 거더사이 체결력			
	50%	100%	150%	200%
축력/진동저감형	77.9	82.1	83.4	84.4
기존교좌장치	89.0	93.7	96.2	98.2
축력저감비(%)	14.3	14.2	15.4	16.4

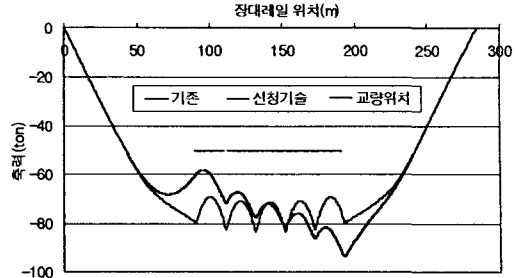


그림 11 경제조건에 따른 장대레일 축력비교

그림 12과 표 2는 온도 변화에 따른 기존교좌장치와 축력/진동저감형 교좌장치 설치에 따른 교좌장치에 작용하는 온도에 의하여 교좌장치에 발생되는 종방향력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기존교좌장치는 온도의 증감, 거더의 증가 및 레일패드의 마찰저항의 증감에 따라 종방향력의 변화가 크고 최대치가 크게 증가됨을 알 수 있다.

표 2 경제조건에 따른 종방향력 비교

구 분	레일과 거더사이 체결력			
	50%	100%	150%	200%
축력/진동저감형	4.0	4.0	4.0	4.0
기존교좌장치	7.6	12.0	14.9	17.9
축방향력비(%)	52.7	33.4	26.9	22.4

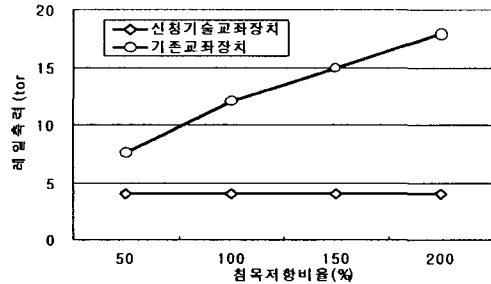


그림 12 체결력에 따른 종방향력비교

그러나 축력/진동저감형 교좌장치는 거더의 수와 관계없이 축력의 증감률이 낮으며 절대 크기 도 또한 낮음을 알 수 있다. 온도 종방향력은 열차의 시·제동하중, 견인력 등과 함께 교좌장치에 종방향력과 열차하중의 충격 및 진동으로 교좌장치를 신속하게 손상시키게 된다. 축력/진동저감형 교좌장치는 종방향력을 현저히 감소시킴으로써 이러한 문제를 해결하였으며 교각 및 교대에 미치는 종방향력도 크게 감소시킴으로써 경제적인 하부구조설계를 가능하게 할 수 있으며, 기존 교량의 레일 장대화에 따른 교각의 보강을 요구하지 않는다.

4. 결론

본 연구는 철도판형교량의 장대 레일의 축력을 감소시킬 수 있는 기존의 여러 가지 방법들과 다르게 교좌장치의 종방향 경제조건 반고정식 제작하여 거더가 양방향으로 거동되게 함으로써 장대 레일의 축력과 교좌장치에 대한 종방향력을 감소시켜 효율적으로 무도상교량의 레일 장대화를 가능하게 하였다.

본 무도상교량 레일 장대화 방법은 교량의 길이에 관계 없이 적용시킬 수 있으며, 궤도재료의 마모 또는 손상 등을 감소시키는데도 유용한 방법이다.

특히 동일 교각상의 교좌장치에서 서로 반대방향의 온도하중이 작용하므로 교각에서 종방향력이 상쇄되어 교각에는 종방향력이 발생되지않으므로 교각의 안정성 제고와 경제적인 설계가 가능케 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원, 경부고속철도 기존선 활용에 따른 판형교 장대부설 및 장대레일 관리방안연구, 2000.12
2. 철도안전연구소, 축력/진동저감형 교좌장치 개발보고서, 2002.7
3. 철도안전연구소, 경부선 청도강교량 판형교 장대화 안정성 검토 용역, 2002.12
4. 佐藤吉彦, “新軌道力學”, 1997
5. American Railways Engineering Association, “1994 Manual For Railways Engineering”, 1994