

장대레일이 설치된 교량에서의 축방향 변위 및 축력 변화 연구

A Study of Longitudinal Forces and Displacements in a Multi-Span Bridge Equipped with a CWR Track

이주헌 *
Lee, Joo-Heon

허영 **
Huh, Young

ABSTRACT

Due to temperature variations, considerable longitudinal rail forces and displacements may develop in continuous welded rail(CWR) track on long-span bridges or viaducts. Excessive relative displacements between sleepers and ballast bed may disturb the stable position of the track in the ballast which results in a lower frictional resistance. Generally, these problems are solved by installing rail expansion devices. However the application of expansion devices in high-speed tracks on existing bridges, as a means to prevent excessive longitudinal displacements and forces, is not attractive method due to comfort, safety and maintenance aspects. An alternative and very effective solution is possibly the use of so-called zero longitudinal restraint(ZLR) fastenings over some length of the track. The calculations, carried out in this respect, show a considerable reduction of track displacements, track forces, and the relative sleeper/ballast displacements. This reduction depends on the length over which these fastenings are installed. In this paper calculations of the longitudinal displacements and forces in a CWR track and substructure resulting from thermal, mechanical and kinematical loads were carried out using the FEM analysis program LUSAS.

1. 서론

장대레일 궤도를 교량이나 고가교 등의 구조물 상에 부설하는 경우, 온도하중 및 기타 하중들에 의해 궤도에서 발생하는 종방향 축력외에 부가적으로 교량이나 고가교의 상판이 온도변화에 따라 신축하기 때문에 종방향 축력이 궤도에 발생하여 궤도 구조에 악 영향을 미치므로 이에 발생하는 축력을 계산, 일정 한도로 제한하여야 할 필요가 있다. 따라서 철도교 교량의 설계는 수직 방향의 열차하중 뿐만 아니라 종방향의 궤도축력을 고려해야 한다. 특히 장대교량의 경우 교량형식, 시간장, 교각단면, 지점배치 방식등이 궤도에 발생하는 축력에 큰 영향을 미치므로 이에 따르는 해석의 필요성이 대두된다.

현재 유럽에서는 교량상 장대레일의 축력 및 안정성 해석을 위해 전용 해석프로그램을 개발하여 적용하고 있고 국내에서도 이와 유사한 전용해석프로그램을 개발하고 있다. 그러나 실제 설계 및 적용시 전용 프로그램을 사용해야 하는 불편함 해소와 비용의 절감을 위해 본 논문에서는

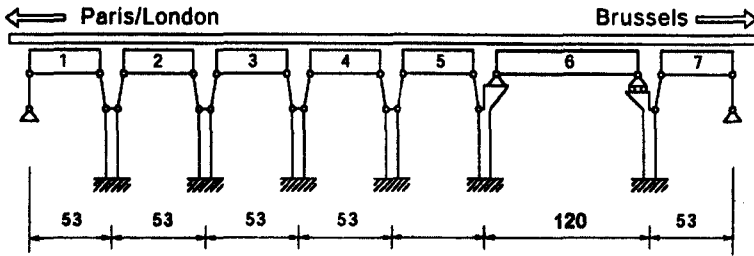
* (재) 한국철도기술공사, 정회원
** 수원대학교 부교수, 정회원

범용 유한요소 프로그램에 의한 해석을 시도하였다.

이를 위해 본 논문에서는 교량상에 부설되는 장대레일 궤도의 종방향 변위 및 축력, 제동하중 작용 및 유럽에서 적용하고 있는 ZLR 체결장치 부설시 궤도의 변위 및 축력 등을 범용 유한요소 프로그램인 LUSAS로 해석하고 네덜란드 Delft 공대(Delft University of Technology)에서 개발한 궤도 축력 및 변위 해석 전용 프로그램 PROLIS20으로 해석을 수행한 결과와 비교, 검증하였다.

2. 해석 모델 및 제원

<그림2-1>은 Brussels - Lille (Paris/London의 분기점)를 잇는 고속철도 노선 상의 교량으로 총연장 438m, 6개의 교각 그리고 2개의 교대로 이루어진 7경간 교량이다. 주 경간, 즉 6번 경간은 폭 120m로 Scheldt 강을 가로지르며 두 개의 강 아치(steel arch)로 이루어져 있다. 또한 이 교량은 두 개의 평행한 바라스트 궤도구조로 콘크리트 침목과 UIC60 레일로 구성되어 있다.



<그림2-1> 교량과 궤도의 개략도

궤도 및 교량을 포함한 전체 구조물은 양쪽 궤도에 대해 대칭이며 6,618개의 노드와 3,077개의 엘리먼트로 구성된 모델로 LUSAS를 사용하여 해석을 수행, 입력 제원은 다음과 같고 PROLIS20 해석 결과와 비교하였다.

<표2-1> 교량 상 CWR 궤도 변위 및 축력 해석 입력제원

레일	$A = 15,372 \text{ mm}^2$ (2 X UIC60) $E = 210 \text{ kN/mm}^2$ $\alpha = 1.2\text{E-}5 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $\Delta T = +40 \text{ }^\circ\text{C}$
경간 1~5, 7	$A = 26\text{E}6 \text{ mm}^2$ $E = 34.75 \text{ kN/mm}^2$ $\alpha = 1.2\text{E-}5 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $\Delta T = +30 \text{ }^\circ\text{C}$ 종축방향 지지 스프링 계수 = 15 kN/mm
경간 6	$A = 10.13\text{E}6 \text{ mm}^2$ $E = 34.75 \text{ kN/mm}^2$ $\alpha = 1.2\text{E-}5 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $\Delta T = +30 \text{ }^\circ\text{C}$ 종축방향 집중하중 = -1,350 kN (마찰에 의해 발생 이동 지점에 작용)
바라스트	$F_{\max} = 20 \text{ kN/mm}$, $u_0 = 2\text{mm}$ (bilinear 특성)
교각	종축방향지지 스프링 계수 = 15,000 kN/mm
제동하중	6번 경간을 포함 400m 구간에 8 kN/m/궤도 작용

3. 각 케이스 별 해석 및 비교

궤도에 온도하중 적용 후 교량에 온도하중 적용

가. 해석 모델

해석 모델의 700m 궤도 전 구간에 온도하중(40℃)이 작용하는 상태에서 추가적인 온도하중(30℃)이 교량의 전체 경간에 그리고 마찰력에 의해 발생하는 집중하중이 주 경간(6번 상판)에 우측 단부 이동지점에 -1350kN이 작용하는 경우에 대해 해석을 실시하였다.

나. 해석 결과

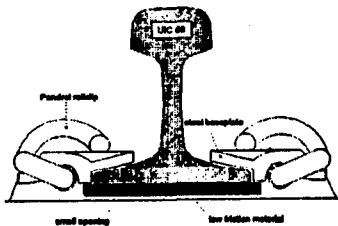
<그림3-1>에서는 변위의 변화곡선을 보이고 있는데 1~5,7번 상판 및 6번 상판의 경우 길이가 각각 53m, 120m이며 이때 궤도에서 발생하는 최대 변위는 6번 상판의 중심부를 기준으로 약 25m 우측지점에서 나타나는데 이는 6번 상판의 좌측단이 현지지점이고 우측단이 이동지점에 따른 영향으로 볼 수 있다. 이때 LUSAS에서는 18.3mm를 얻었으며 PROLIS20에서는 18.4mm로 거의 같은 결과를 나타냄을 알 수 있다. <그림3-2>에서는 교량 변위와 궤도 변위의 차로 구해진 상대변위 곡선을 보이고 있다. 이때 최대 상대변위는 주 경간(6번 상판)의 이동단에서 PROLIS20에서는 28.6mm, LUSAS에서는 31.3mm로 다소 차이가 있었으나 전체적인 변위의 거동 형상이나 6번 경간을 제외한 부분에서는 거의 같은 결과를 나타내고 있다. 일반적으로 침목과 바ラスト 사이에 종방향 저항이 레일과 침목 사이의 저항보다 작고 변위의 탄성 부분이 제한되어 있으므로 대부분의 상대변위들이 바ラスト에서 침목의 이동에 의해 발생하며 <그림3-3>에 보인바와 같이 궤도의 최대 압축력은 약 -2300kN(레일 당 1150kN)에 다다름을 볼 수 있으며 이때 결과는 UIC leaflet 774-3R에서 규정하는 범위를 만족한다. 이때 레일에 40℃의 온도상승이 발행한 후 교량 상판의 온도가 30℃로 증가한 경우를 해석한 결과인 <그림3-1>의 변위곡선을 보면 교량구간을 벗어나 일정 구간으로부터 비로소 레일의 변위가 점차적으로 0에 수렴함을 보이고 있다. 또한 <그림3-3>에서는 레일에 40℃의 온도가 항상 작용하고 있는 상태이기 때문에 축력 변화 곡선이 약 1500kN을 기준으로 변화 함을 볼 수 있으며 <그림3-5>의 PROLIS20의 결과와 비교하였다.

ZLR 체결장치 부설

가. 해석 모델

6번 경간의 우측단부로부터 각각 39m, 75m 구간에 걸쳐 ZLR 체결장치를 부설한 경우에 대해 종방향 변위 및 축력변화 해석을 수행하였다.

<그림3-4>은 ZLR(Zero Longitudinal Restraint)이라고 하는 미끄럼 발생 체결장치로 형식은 특정한 강 저면판(steel baseplate)으로 구성되어 있으며 이는 침목에 팬드롤(Pandrol) 레일 클립으로 고정되어 있다. 일반적인 상태에서 저면판과 레일 하부의 윗면 사이에 약간의 공간이 있으나 횡방향력이 크게 작용할 때 저면판은 레일이 넘어가는 것을 방지한다. 레일 밑의 레일 패드는 Teflon같이 마찰력이 작은 재료로 만들어져 있는데 열차하중이 없는 경우 레일과 침목간에 마찰이 없이 자유롭게 움직일 수 있게 한다. 열차하중이 있는 경우 이 레일 패드는 제동하중에 대해 어느 정도 저항한다.



<그림 3-4>

나. 해석 결과

신축장치 부설의 해석결과에 제시

신축장치(Expansion device) 부설

가. 해석 모델

최대 상대변위가 발생하는 지점(6번 상판의 이동지점 부근) 레일에 전형적인 형태의 신축장치(Expansion device)를 설치한 경우에 대해 해석을 실시하였으며 레일 및 교량에 대한 제원은 궤도에 온도하중 적용 후 교량에 온도하중 적용 결과 및 ZLR 체결장치부설시의 결과와 비교하기 위해 <표2-1>의 값을 사용하였다.

나. 해석 결과

일반 장대레일(Case I), 39m, 75m구간에 ZLR 체결장치 부설(CaseⅢ,Ⅳ), 그리고 일반적인 신축장치(Expansion device)를 부설(CaseⅡ)한 경우에 대한 변위 변화곡선을 비교를 목적으로 <그림3-6>에 도시하였다. 해석 결과 일반 장대레일의 경우 최대변위가 18.4mm였으나 6번 상판의 우측단부로부터 39m, 75m구간에 걸쳐 ZLR 체결장치를 부설한 경우 궤도의 최대변위는 각각의 경우에 대해 12.6mm와 7.0mm로 감소함을 볼 수 있다. 그러나 신축장치(Expansion device)를 부설한 경우 신축장치가 있는 지점에서 변위의 차가 74mm에 다다르는데 특정한 신축장치를 사용하는 경우 레일의 변위가 220mm까지 발생한다고 한다²⁾. 따라서 궤도의 안정성에 악 영향을 미치리라는 예상을 할 수 있다. <그림3-7>에 교량 상판의 변위에서 궤도의 변위의 차 즉 상대변위를 도시하였는데 일반 장대레일 궤도의 상대변위 31.3mm 보다 ZLR 체결장치를 부설한 경우 37.5mm(PROLIS20 37mm)와 42.2mm(PROLIS20 41.7mm)로 증가해 오히려 상태가 악화되는 것 처럼 보인다. 하지만 점선으로 표시되어 있는 궤도의 ZLR 체결장치 구간에 대한 상대변위를 제거하는 경우 궤도와 교량 사이에 마찰력이 발생하는 구간, 즉 ZLR 체결장치가 없는 지점에서의 최대 상대변위는 17.6mm와 9.3mm로 감소함을 보인다. 이는 ZLR 체결장치가 없는 일반 장대레일 궤도와 비교하여 각각 63%, 33% 임을 보여준다. 이때 신축장치를 부설한 경우 궤도와 교량간의 최대 상대변위는 상대적으로 작은 값을 보인다.(절대값 10.5mm) <그림3-8>에서는 궤도의 축력을 도시하였는데 일반 장대레일 궤도와 비교하여 ZLR 체결장치를 부설한 경우 궤도 및 교량에서 발생하는 최대 압축력 또한 비례적으로 다소 감소함을 알 수 있다. 위의 해석 결과로 ZLR 체결장치의 부설은 일반 장대레일 궤도나 신축장치(Expansion device)를 부설한 경우 보다 변위 및 축력의 감소면에서 좋은 결과를 보임을 알 수 있다. 또한 <그림3-9>의 PROLIS20의 결과와 비교하였다.

ZLR 체결장치 부설구간(75m)에 제동하중 적용

가. 해석모델

75m구간에 걸쳐 ZLR 체결장치를 부설한 모델의 궤도에 제동하중이 작용하는 경우에 대해 해석을 실시하였다. 이때 제동하중은 TGV 열차에 의한 것으로 8kN/m의 제동하중을 열차 길이인 400m를 궤도에 적용시켰다.

나. 해석결과

<그림3-10>에서는 TGV 열차의 제동하중이 궤도에 좌측 및 우측방향으로 작용하는 경우의 해석 결과로 제동하중이 작용하지 않을 때의 변위 변화곡선과 함께 도시하였다. 제동하중이 교량의 신축방향 즉 오른쪽으로 작용한 경우 제동하중이 작용하지 않을 때와 비교하여 6번 상판의 우측단

2) Coenraad Esveld, TU Delft press 1997

부로부터 약 40m 지점에서 궤도의 최대 변위가 11.1mm가 발생하였으며 PROLIS20로 해석 결과 11.4mm였다 제동하중이 왼쪽으로 작용한 경우 또한 최대 변위가 약 5mm로 결과가 거의 같음을 볼 수 있다. 제동하중이 교량의 신축방향의 반대로 즉 왼쪽으로 작용한 경우에 <그림3-11>에 보인 바와 같이 ZLR 체결장치가 없는 부분의 최대 상대변위가 16.4mm(PROLIS20 16.7mm)로 증가한다. (제동하중이 없는 상태와 비교하여 약 80%정도 큰 값) <그림3-12>에서는 제동하중 작용에 따른 궤도의 축력을 도시하였는데 제동하중이 작용하지 않는 경우보다 제동하중 작용시 약 150~200kN의 축력증가를 보여 제동하중을 배제해서는 안 됨을 알 수 있다.

그러나 본 해석의 가정인 ZLR 체결장치 부설시 궤도에 수직으로 하중이 작용한 경우 ZLR 체결장치 구간에 종방향 저항이 없다는 가정은 물론 비현실적이다. 따라서 이러한 문제점들을 고려해 볼 때 바ラスト에서 침목의 미끄러짐에 의해 발생하는 상대변위의 소성영역은 실제보다 작을 것으로 예상되며 이를 <그림3-13>의 PROLIS20의 결과와 비교하였다.

4. 결론

본 논문에서 사용한 범용 유한요소 구조해석 프로그램 LUSAS에 의한 해석값과 Delft University of Technology에서 개발한 궤도 전용 해석 프로그램 PROLIS20에 의한 해석 값이 거의 같은 결과를 얻음에 따라 교량 및 궤도 구조물 설계에 범용 유한요소 구조해석 프로그램을 적용하여 보다 쉽게 설계 및 검토를 할 수 있어 현재 국내에서 개발단계에 있는 전용해석 프로그램을 대치할 수 있다. 또한 교량 구조물을 종방향 스프링(spring)요소 대신 빔(beam)요소로 적용이 가능함에 따라 교각의 휨강성을 고려한 해석이 가능하며 지반의 특성 및 바ラスト와 교량 상판의 마찰을 고려한 해석 또한 가능하며 본 해석의 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

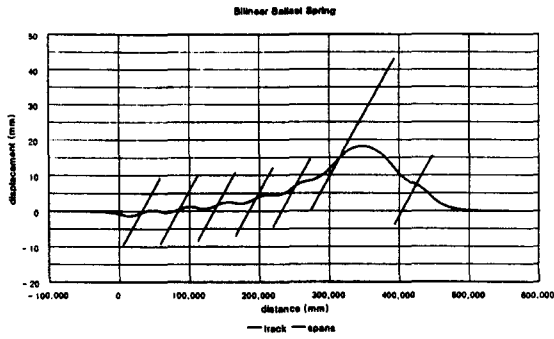
기설된 교량 상 고속철도 궤도에서 발생하는 종방향 변위와 힘을 방지하기 위한 신축장치(expansion device)의 적용은 승차감, 안전성 및 유지관리 차원에서 비 효율적이다. 이에 대체 가능하고 효율적인 방법으로 궤도의 일정구간에 대해 ZLR(Zero Longitudinal Restraint) 체결장치를 적용하는 것이다. ZLR 체결장치의 적용에 대한 수치해석 결과 궤도의 변위, 궤도 축력과 침목/바ラスト 간의 상대변위에서 상당한 감소 효과를 나타냄을 알 수 있었으며 이러한 감소 효과는 ZLR 체결장치의 길이와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

ZLR 체결장치의 적용은 온도 제한 또는 구조적 한계 등에 대해 현재까지 잘 알려져 있지 않아 유럽에서도 아직 많은 곳에 적용을 하고 있지 않으나 ZLR 체결장치의 설치여부는 충분한 측정결과가 얻어진 후 적용한다면 해석적 결과에서처럼 만족할 만한 결과를 얻을 것이다.

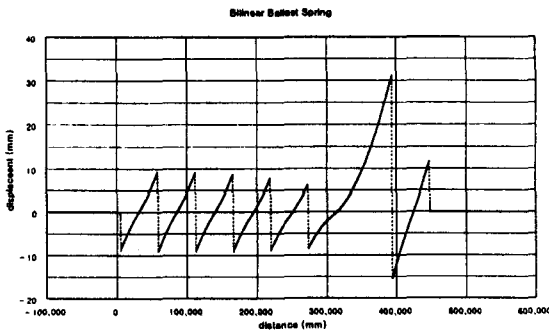
또한 교량의 형식 및 지점의 형식에 따른 해석 결과에서는 힌지지점이 교량상판의 중앙부에 위치한 경우 힌지지점이 교량의 단부에 위치한 것보다 궤도에서 발생하는 변위 및 축력의 감소에 좋은 형식이라는 것을 볼 수 있었으며 이는 즉 교량의 형식과 지점의 형식 및 배치가 장대레일 궤도 축력에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

그리고 도상저항력에 따른 축력 해석에서는 열차하중을 고려한 해석을 수행할 때 종방향 하중뿐 아니라 수직하중이 동시에 작용하므로 도상저항력을 열차하중 비재하시의 도상저항력과 같게 적용해서는 안 됨을 알 수 있다.

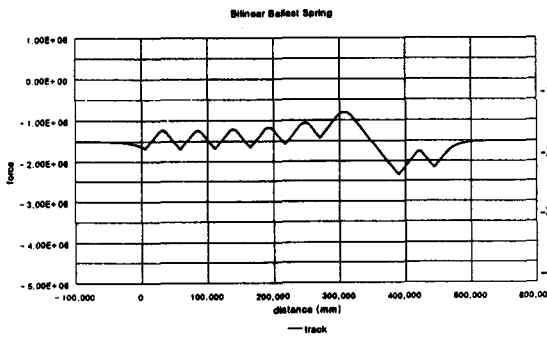
추후 연구과제로는 첫째, 교량 상 궤도구조 해석시 교량 상판과 바ラスト간에 마찰력을 고려한 해석과 둘째, 지반의 특성을 고려한 교량구조물과 궤도구조의 상호작용에 대한 해석을 들 수 있다.



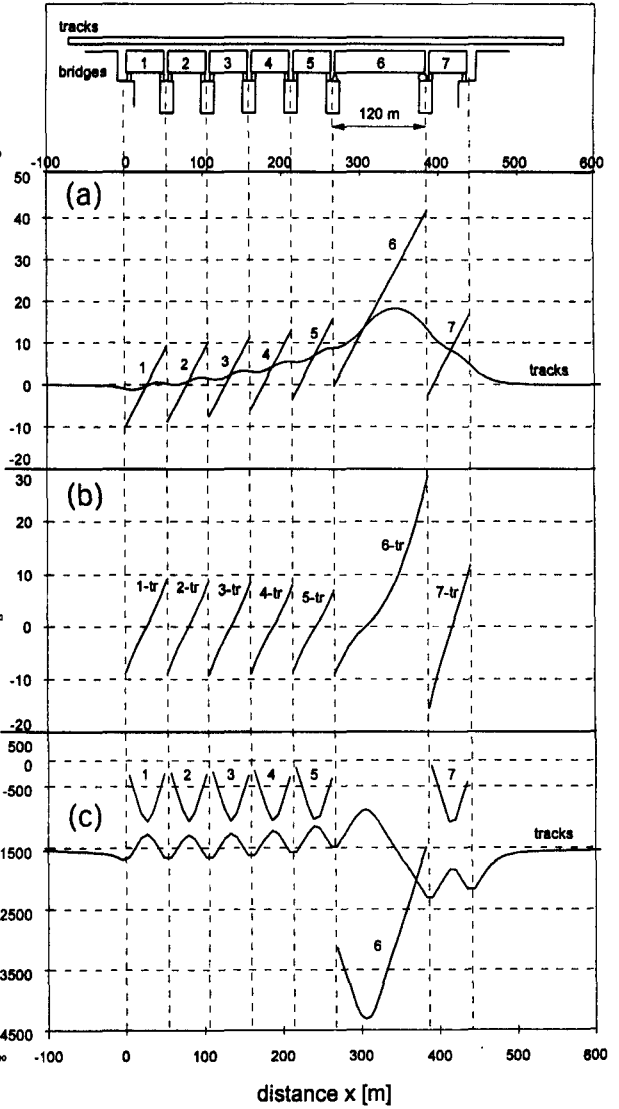
<그림 3-1>



<그림 3-2>

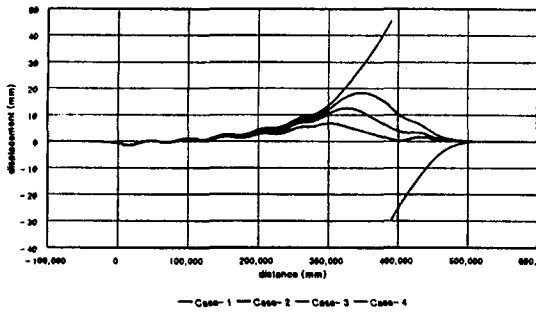


<그림 3-3>



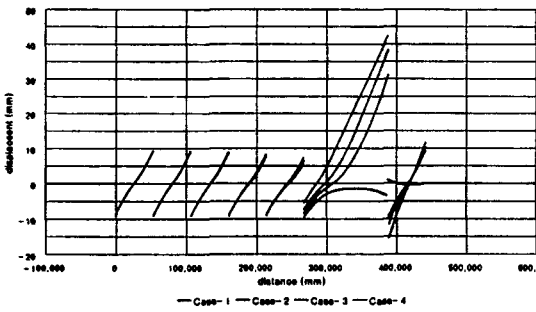
<그림 3-5>

각 케이스 별 변위 비교



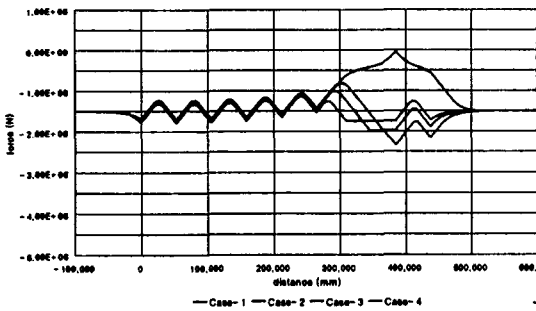
<그림 3-6>

각 케이스 별 상대변위 비교

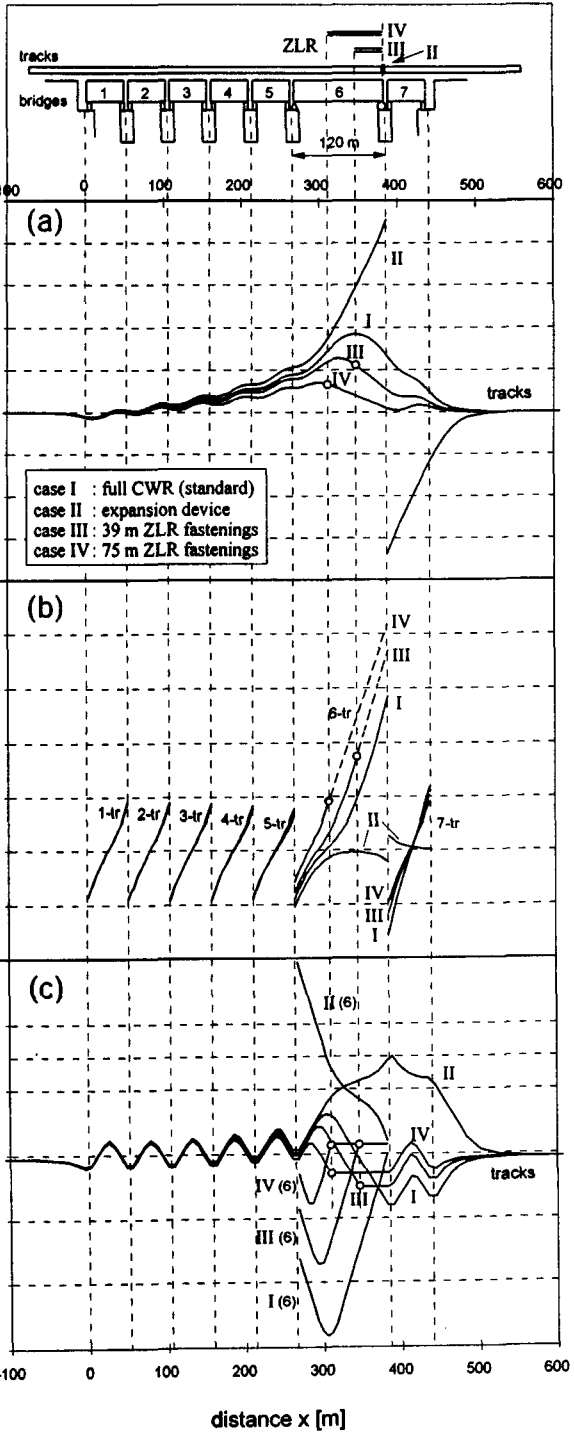


<그림 3-7>

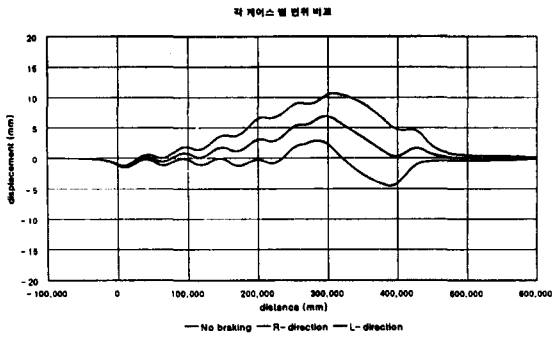
각 케이스 별 축력 비교



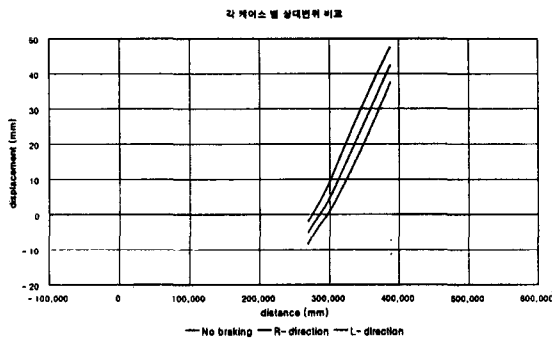
<그림 3-8>



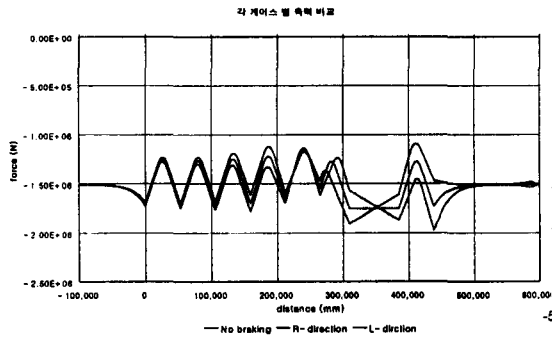
<그림3-9>



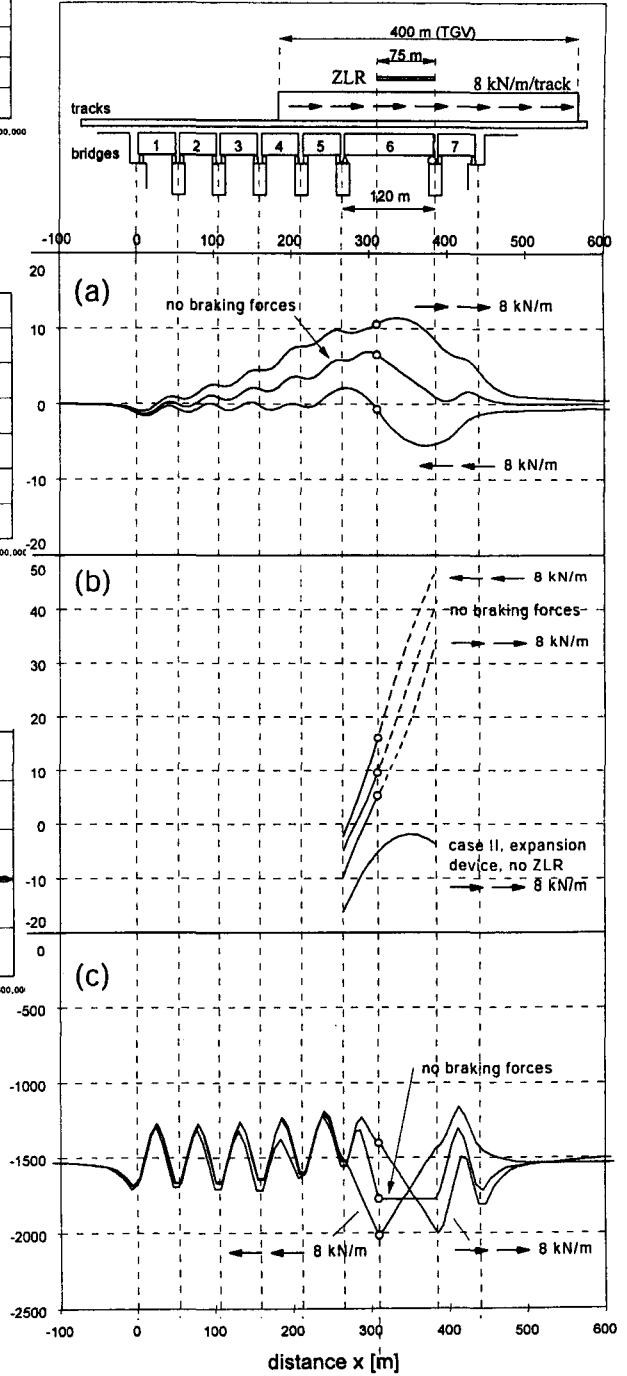
<그림 3-10>



<그림 3-11>



<그림 3-12>



<그림 3-13>