

# 레일/교량 상호작용을 고려한 레일축력 해석

## Analysis of Rail Force considering Rail/Bridge Interaction

김병석\*  
Kim, Byung-Suk

김영진\*\*  
Kim, Young-Jin

강재윤\*\*  
Kang, Jae-Yoon

---

### ABSTRACT

Recently, continuous welded rail (CWR) track has been adopted for railway track structure of great advantages of reducing maintenance costs, and of increasing life time of track components and the comfort of passengers. But, in this case, a temperature or mechanical load will result in high stress and the track breakage or buckling may occur. Especially when the CWR is laying on the bridge structure, the relative displacement of these structure can be increased and this results in the instability of track. In this paper, the main factors affect on the longitudinal rail force are discussed and the computer program is developed for the analysis of rail force considering the interactions with sub-structure.

---

### 1. 서론

레일축력에 관한 기존의 연구 결과를 살펴 보면 교량구간과 토공구간에서의 레일축력은 서로 다른 양상을 보인다. 온도변화에 의한 레일축력을 검토해 보면 토공구간에서는 축력이나 변위의 변화가 거의 없는 일정한 값을 유지하는 경향을 보이지만 교량구간에서는 레일과 교량구조물간의 물성치가 다르므로 상대변위가 발생하여 결과적으로 레일에 추가적인 축력을 일으키게 된다. 특히 대부분의 궤도구조를 장대레일로 하는 고속전철교량 궤도구조의 경우에는 온도하중 및 시동/제동하중이 작용할 때 레일에 과도한 축력이 발생하여 레일이 파단하거나 좌굴할 위험이 높으므로 레일축력을 정확하게 계산하는 것이 주행안전성 측면에서 매우 중요한 사항이다.

여러 연구결과에 따르면 교량구간에서의 레일축력은 도상의 저항력 및 교량의 신축길이, 지점배치, 하부구조 강성 등에 의해 영향을 받게 되며, 이러한 레일-교량간의 상호작용에는 도상의 비선형적 거동이 매개로 작용하게 되므로 축력 계산 결과의 정확도 및 신뢰도를 높이기 위해서는 도상의 비선형 특성, 교량 구조물의 강성 및 지반의 강성을 고려하여 해석을 수행해야 한다.

본 연구에서는 고속전철교량의 장대레일 궤도구조에 있어서 레일/교량 상호작용을 고려한 레일축력 검토를 위하여 도상의 비선형 재료특성, 교량 하부구조의 강성 및 지반강성을 고려한 레일축력 해석 프로그램을 작성하고 적용성을 검토하였다.

---

\* 한국건설기술연구원 구조연구실 수석연구원

\*\* 한국건설기술연구원 구조연구실 연구원

## 2. 레일축력 변화의 영향인자

레일축력은 레일과 교량간의 온도변화 차이에 의한 상대적 구속력에 의해 발생하거나, 열차의 시동 및 제동하중이 외력으로 작용할 때 발생한다. 온도변화에 의한 레일의 용력은 레일의 신축이 구속되어 있는 경우에 발생하며, 궤도구조에서 체결구 및 도상의 저항력이 레일신축의 구속력으로 작용하여 레일축력을 일으키는 원인이 된다. 레일의 평균 종방향용력이 0이 될 때의 온도를 중립온도(neutral temperature,  $T_n$ )라 정의하고, 레일의 온도가 중립온도보다 높을 때에는 온도하중은 레일에 압축력으로 작용하여 좌굴 안정성에 대한 검토가 요구되고, 상대적으로 낮을 때에는 인장력으로 작용하므로 장대레일 용접부에서의 파단 위험성 또는 레일 신축장치에서의 개구량 검토가 필요하다. 레일에 있어서 인장력에 의한 파단보다 압축력에 의한 좌굴이 더 심각한 문제이며, 이 때문에 레일의 중립온도는 레일의 최대 및 최소 설계온도의 평균치보다 높게 설정한다.

열차에 의해서 레일에 작용하는 하중에는 수직하중, 종방향하중 및 횡하중이 있다. 종방향 하중의 경우에는 차량의 시동 및 제동하중을 들 수 있으며, 온도하중과는 달리 짧은 시간에 큰 하중이 레일에 직접적으로 작용하게 되므로 레일의 초기용력 상태에 따라 갑작스런 파단 또는 좌굴이 발생할 위험이 높다.

교량상에서의 레일축력은 궤도와 교량구조물로 분배되며, 이때의 분배율은 궤도와 교량간의 상대변위에 대한 저항력의 크기와 종방향 변위에 대한 구조물의 저항력, 즉 하부구조의 강성에 의해 결정된다. 즉, 레일에 추가용력을 발생시킬 수 있는 교량구조물의 변형은 본질적으로 하부구조의 강성에 의존하므로 해석시에는 하부구조의 강성 결정에 신중을 기해야 한다. 교량구조 측면에서의 레일-교량 상호작용의 지배변수는 다음과 같은 사항을 들 수 있다.

- 고정지점의 위치 및 종류
- 상판의 신축길이 및 단부 스펠의 길이
- 상판의 단면2차모멘트 및 탄성계수
- 받침의 강성
- 상판의 높이 및 중립축의 위치

참고로 독일에서는 하부구조 및 기초의 강성이 레일의 추가용력 발생에 큰 영향을 미친다고 보고, 이 강성을 결정하기 위하여 1984년부터 1986년 사이에 독일 고속전철 신선 구간의 4개 교량에 대해 실험실험을 실시하였다. 이 실험에서 교각 및 지반 강성을 결정하기 위한 측정인자는 다음과 같다.

- foundation level에서 수평하중을 작용시킨 뒤 확대기초 혹은 말뚝기초의 변위와 경사도를 측정
- pier에 수직하중을 재하한 경우와 재하하지 않은 각각의 경우에 대해 pier head level에서 수평하중을 작용시킨 뒤, 변위와 경사도를 측정

장대레일 궤도구조에 발생하는 문제점은 크게 레일의 좌굴과 파단에 대한 문제점으로 나뉘어진다. 이 두가지 문제점 중에서 레일의 좌굴에 관한 문제가 전체적인 궤도 안정성에 중요한 부분을 차지하며 레일의 종방향 축력을 검토하는 것도 레일의 축력을 소요의 값으로 제한하므로써 레일의 좌굴을 방지하는 데에 목적이 있다고 할 수 있다.

## 3. 궤도구조의 종방향 저항 메커니즘

궤도의 종방향 저항력은 레일과 침목간의 체결구에서 발생하는 저항력(그림 1의 b)과 침목과 도상간의 저항력(그림 1의 c)으로 나뉘어지며, 궤도에서 발생하는 모든 종저항력은 이 두 저항력의 결합으로부터 발생한다. 즉, 레일에 적은 하중이 작용할 때에는 체결구에서 어느 정도의 종방향 변위가 발생하다가 하중이 증가하면서 레일과 침목이 함께 도상내에서 변위를 일으키며, 이러한

거동은 수직하중의 크기에 따라 달라진다. 즉, 하중작용 초기단계에는 체결구에서 어느 정도의 종방향 변위가 발생하다가 하중이 증가하면서 레일과 침목이 함께 도상내에서 변위를 일으키며, 이러한 거동은 수직하중의 크기에 따라 달라진다.

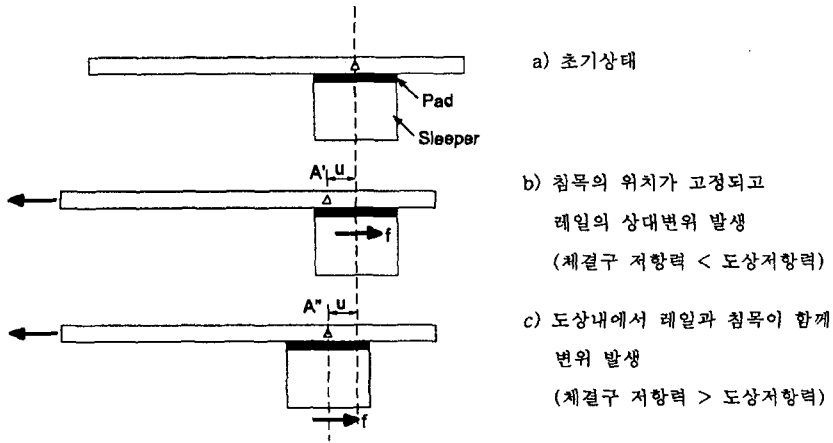


그림 1. 종방향 저항 메커니즘

여러 실험결과에 의해 UIC Leaflet 774-3R을 비롯한 대부분의 시방규정 또는 문헌에서는 변위-저항력 관계를 bi-linear로 규정하고 그림 2와 같은 관계곡선을 제시하고 있다. 이 관계곡선으로부터 궤도의 종저항력은 도상의 다짐상태 뿐만 아니라 수직하중의 재하 여부에 따라 다른 거동을 보임을 알 수 있다.

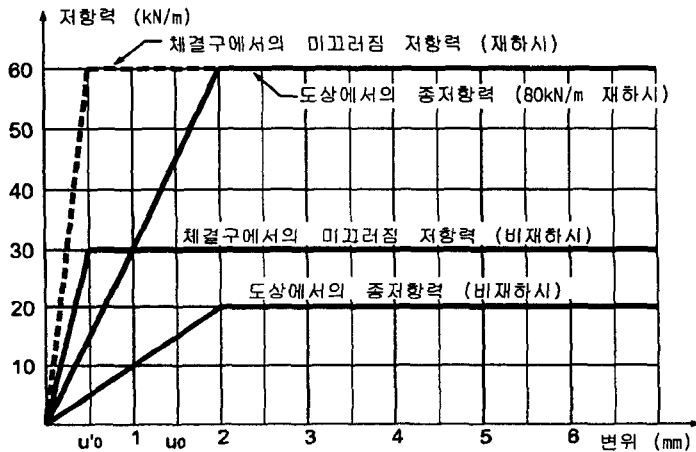


그림 2. 궤도의 종방향력-변위 관계 (UIC Leaflet 774-3R의 규정)

#### 4. 레일축력 해석 프로그램의 개발

본 연구에서 작성한 레일 축력 및 좌굴검토를 위한 유한요소 해석 프로그램에서는 궤도축력에 대한 횡방향 변위, 즉 좌굴영향을 고려하여 그에 따른 축력의 변화를 검토할 수 있도록 하였고, 시동/제동하중에 대한 해석시 차량에 의한 수직하중이 작용한다고 간주하여 일정 비율로 도상저

항력이 증가하도록 하였다. 또한 교량 하부구조의 강성이 레일축력에 큰 영향을 미친다는 관점에서 받침강성, 교각강성 및 지반강성을 뼈대요소로 직접 모델링하거나 등가 스프링의 강성을 직접 입력할 수 있도록 하였다. 해석 알고리즘으로는 도상의 비선형 거동과 좌굴거동을 동시에 해석할 수 있도록 하기 위하여 Newton-Raphson 방법을 이용한 기하 비선형 해석 알고리즘을 적용하였다.

도상은 일정한 변형 수준까지는 탄성적으로 거동하다가 임의의 한계수준(항복변위)을 넘게 되면 외력에 대해서 더 이상 저항하지 못하고 일정한 크기의 저항력만을 갖는 bi-linear 스프링 요소로 모델링한다. 도상에 의한 종방향 저항력은 침목간격으로 분산되어 작용하지만 일반적으로 레일과 교량사이에 bi-linear 스프링 요소가 일정한 간격으로 등분포 되어 있는 것으로 가정한다. 또한 시동 및 제동하중이 작용하는 경우에는 차량의 수직하중에 의하여 도상의 저항력이 증가할 수 있으므로 비재하시의 도상저항력에 대한 재하시의 도상저항력의 비를 입력하므로써 필요에 따라 수직하중에 의한 도상저항력의 증가를 고려할 수 있도록 하였다.

레일 및 교량 상판부재는 절점당 6자유도를 갖는 뼈대요소(frame요소)로 모델링한다. 교각은 일반적으로 스프링요소로 치환하지만 휨거동을 반영하고자 하는 경우에는 뼈대요소로 모델링한다. 받침 및 지반의 강성에 대해서도 그 종방향 강성만을 고려한 선형 스프링요소로 치환한다.

레일축력 해석을 위한 해석모형의 예는 그림 3과 같다.

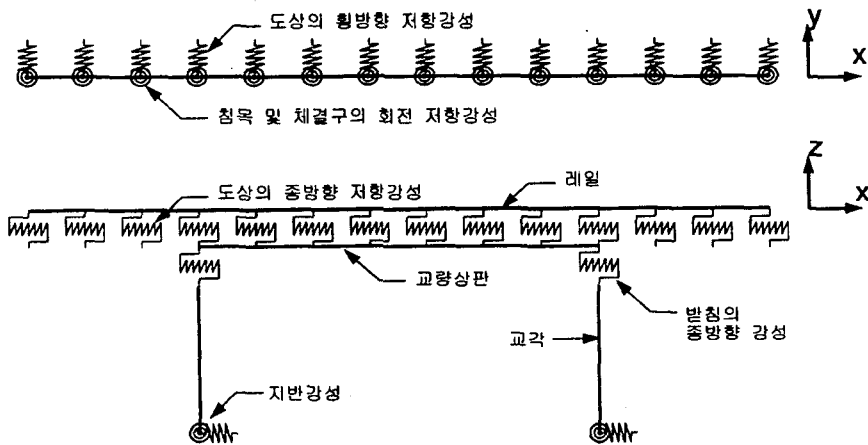


그림 3. 레일축력 해석을 위한 유한요소 모델의 구성

본 프로그램에서는 도상의 비선형 거동 및 레일의 횡방향 좌굴거동을 해석하기 위한 알고리즘으로서 Load-controlled Nonlinear Incremental Solver를 도입하였다. 이 해석 알고리즘에서는 작용하중을 여러 개의 하중단계로 분할하고, 각 하중단계의 시점에서 현재의 기하좌표와 그에 대한 내력을 이용하여 변형된 구조시스템의 기하강도 매트릭스를 구성하여 반복수렴계산(iteration) 과정에서 강성도 매트릭스 및 하중벡터를 재구성하면서 구조계의 평형을 만족하는 변위벡터를 결정한다.

즉, 각 하중단계에 대해서 강성도 매트릭스와 하중벡터를 제어하므로써 구조시스템을 선형해석 모델로 치환하며, 전체계가 평형을 이룰 때까지 반복계산을 수행한다.

## 5. 매개변수 해석

### 가) 도상저항력에 의한 레일축력 변화

도상의 종방향 저항력은 케도저항력 메커니즘에 의하여 레일의 신축을 방해하는 구속력으로 작

용하므로 도상의 종방향 저항력이 클수록 레일의 변위 및 축력이 증가한다.

이를 살펴보기 위하여 도상저항력이 0.5kN/m, 1.0kN/m, 2.0kN/m 및 4.0kN/m로 변화할 때의 레일 축력 및 종방향 변위를 해석하고 그 결과를 다음의 그림 4의 a 및 b에 나타내었다.

◎ 요소별 재료 특성

▶ 레일 :  $E = 210 \times 106 \text{ KN/m}^2$

$A = 0.015372\text{m}^2$

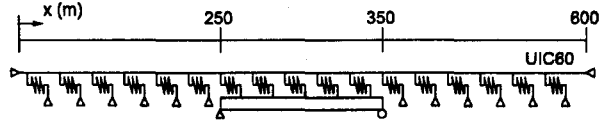
$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

▶ 도상 (2.5m당) :  $U_y = 0.0002\text{m} = 0.2\text{mm}$

▶ 교량 :  $E = 25 \times 106 \text{ KN/m}^2$

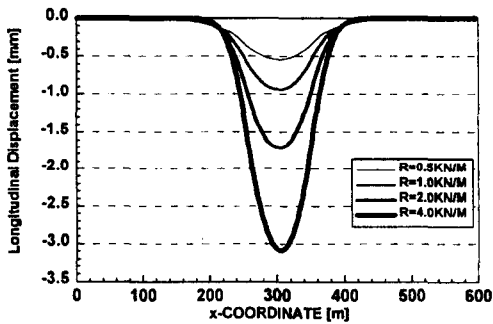
$A = 4.0\text{m}^2$

$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

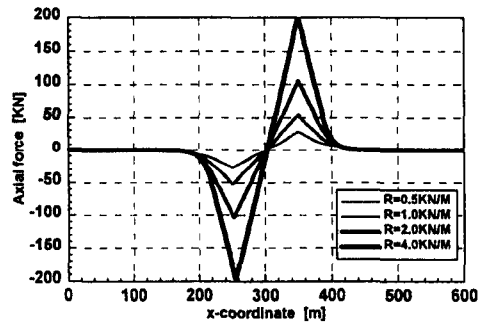


◎ 작용하중

▶ 온도하중 :  $-20^\circ\text{C}$  (교량구조물에만 작용)



(a) 레일 종방향 변위

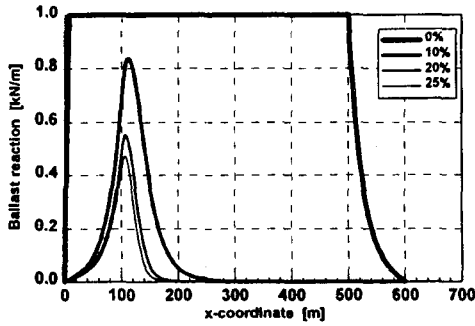


(b) 레일 축력

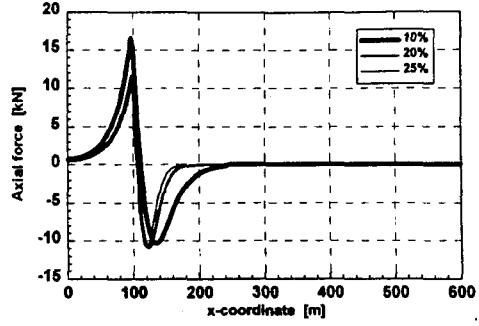
그림 4. 도상 저항력에 대한 레일의 종방향 변위 및 축력

도상의 저항력은 다짐상태가 좋을수록 증가하지만, 수직하중에 의해서도 증가한다. 즉, 시동/제동하중이 작용할 때에는 종방향 하중 뿐만 아니라 하중작용 영역내에서 수직하중도 동시에 작용한다고 볼 수 있으며 이 수직하중의 영향으로 도상의 저항력이 증가하므로 시동/제동하중에 대한 레일축력을 더욱 엄밀히 검토하고자 하는 경우에는 수직하중의 영향을 반드시 고려해야 할 것이다.

위와 동일한 궤도모델에 대해서 종방향 등분포 하중 2.5kN/m가 레일상 100m~350m구간에 작용하는 경우, 수직하중의 영향을 고려하지 않았을 때는 거의 모든 도상이 항복하고 최대 레일축력이 194.76kN으로 나타났다. 그러나, 종방향 하중 재하구간에 대해서 도상의 저항력을 일정 비율로 증가시켰을 때는 도상의 항복 영역이 급격히 감소하였으며 최대 레일축력도 수직하중을 고려하지 않을 때의 최대 축력에 비해 상당히 감소하여 15kN 내외의 값을 보임을 알 수 있었다. 즉, 수직하중에 의한 도상 저항력의 증가로 인하여 도상이 항복하지 않았고 도상을 매개로 한 교량강성과의 상호작용으로 수평하중에 대해 충분한 저항력을 발현한 것으로 분석할 수 있다.



(a) 도상저항력 분포



(b) 레일축력 분포

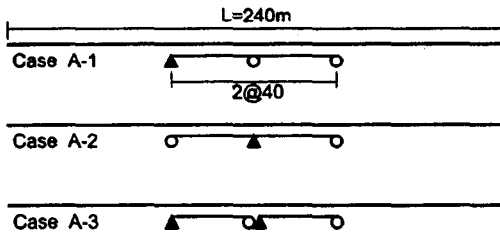
그림 5. 수직하중에 의한 도상 저항력 증가를 고려한 해석결과

나) 교량 신축길이에 대한 레일축력 변화

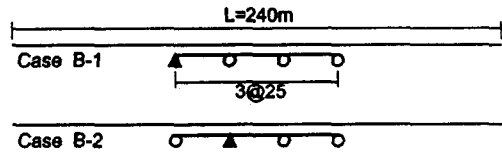
교량의 신축길이에 따른 레일의 축력변화를 알아보기 위해 다음의 해석 모델에 대하여 해석을 실시하였다. 경간장 40m의 2경간 교량과 경간장 25m의 3경간 교량에 대하여 해석모델을 구성하고 교량의 신축길이를 변화시키기 위하여 고정받침의 위치를 변화시켰다. 해석모델에서 두 개의 레일을 하나의 보로 치환하였으며 레일의 탄성계수  $E=210 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ , 단면적  $A=0.015372 \text{ m}^2$  (2UIC60레일), 열팽창계수  $\alpha=1.2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 이다.

교량은 탄성계수  $E=25 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ , 단면적  $A=4.0 \text{ m}^2$ , 열팽창계수  $\alpha=1.2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 이다.

도상의 종방향 저항력은 1m당 5000kN/m의 종방향 강성을 갖는 스프링요소로 치환하며 종방향 항복변위 0.2mm에 대하여 최대 저항력은 1kN이다.



(a) 2경간 교량 (2@40m)



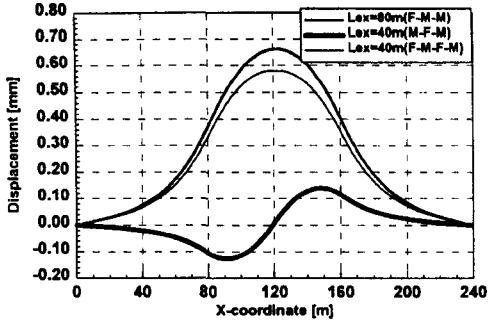
(b) 3경간 교량 (3@25m)

그림 6. 교량신축길이에 대한 축력변화 해석 모델

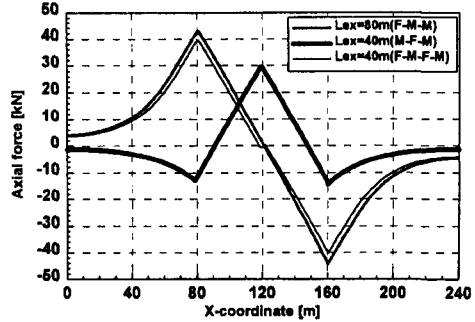
해석모델의 신축길이 및 받침의 배치형태를 변화시켜 해석한 결과를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 교량신축길이에 대한 레일축력해석 결과 비교

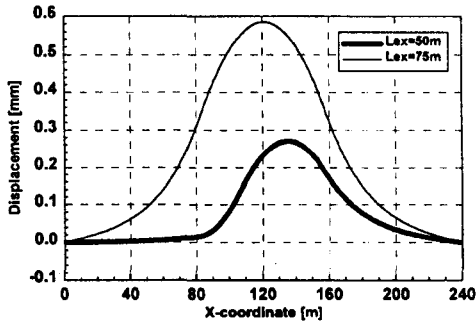
해석모델	최대 신축길이 $L_{ex}$ [m]	받침배치 (F:고정, M:가동)	레일의 최대 종변위 [mm]	레일의 최대 축력 [kN]
A-1	80	F-M-M	0.66	44.7
A-2	40	M-F-M	0.14	29.3
A-3	40	F-M,F-M	0.58	40.6
B-1	75	F-M-M-M	0.58	40.9
B-2	50	M-F-M-M	0.27	28.9



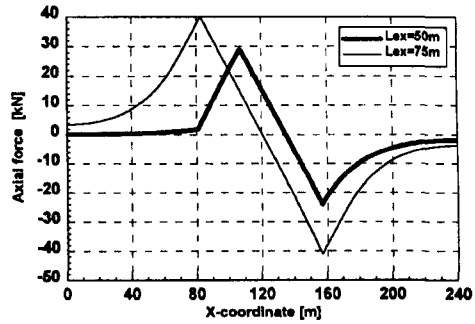
(a) 레일 종방향 변위(CASE A-1,2,3)



(b) 레일축력 (CASE A-1,2,3)



(a) 레일 종방향 변위 (CASE B-1,2)



(b) 레일축력 (CASE B-1,2)

그림 7. 신축길이 변화에 따른 레일축력 해석

해석 결과로부터 교량의 신축길이가 작아짐에 따라 레일축력도 감소함을 알 수 있었으나, 교량의 지지조건에 따라 그 감소율이 현저히 달라짐을 보였다. 즉, CASE A-2와 A-3의 경우를 비교해 보면 두 경우에 대해서 교량의 신축길이는 동일한 40m이지만 받침배치에 따라 레일축력은 상당한 차이를 보이고 있다. CASE A-3의 경우, 교량 신축길이는 CASE A-1의 1/2로 감소했지만 레일축력은 거의 변화가 없다. 이는 CASE A-3의 경우에 비록 교량신축길이는 절반 수준으로 감소했지만 교량에서 발생하는 변위의 방향이 CASE A-1과 동일한 방향으로 발생하면서 교량의 신축에 의한 레일과의 상대변위에 거의 변화가 없으며, 결과적으로 축력이 거의 동일하게 나타났다고 볼 수 있다.

상대적으로 CASE A-2의 경우에는 고정지점이 스패 중앙에 위치하므로써 교량의 변위가 고정지점을 기준으로 양방향으로 분산되어 레일과의 상대변위를 상쇄시키는 작용을 하므로써 상대변위량을 상당히 감소시켰고, 그에 따른 레일축력도 감소했음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 CASE B-2의 경우에도 알 수 있었다.

## 6. 결론

교량상 장대레일의 경우에는 온도변화 및 시동/제동하중 등의 외력에 대하여 레일과 교량구조물이 서로 다른 거동을 보이며, 그로 인한 레일의 축력 변화는 복잡한 양상을 보인다. 이 때의 축력계산은 일반적인 간단한 이론식 만으로는 정확한 산정이 어려우며 유한요소법을 이용한 해석 프로그램의 개발이 요구된다.

교량상 장대레일의 축력검토에 있어서는 도상의 비선형적 재료 특성과 교량 및 지반의 강성을

함께 고려하는 것이 중요한 사항이며 레일에 추가응력을 유발하는 교량 구조물의 변형은 하부구조의 강성에 의존하므로 교량의 하부구조(교각, 교대 및 기초) 강성의 정확한 평가가 필수적이다.

#### 참고문헌

1. M.A. Van, Stability of Continuous Welded Rail Track, TU-Delft University Press
2. M.A. Van, "Buckling Analysis of Continuous Welded Rail Track", HERON, Vol.41, No.3. pp.175-186, 1996
3. ERR-D202/Report No.3, Theory of CWR track stability, European Rail Research Institute, Utrecht, 1995
4. UIC Code 774-3, General Principles of Calculating Longitudinal Forces in a Bridge, its bearings and its substructure - Recommendations for a simple case, 1st Ed., 1995.7.
5. G. Meyer and P. Ruse, "Design System used by the German Federal Railway for Valley Bridges on the New Railway Lines", pp.49~81, Ingenieurbauwerke, IBW Talbrücken, Nr.4, 1987.3.
6. R. Bienstock, H.D. Eisert and W. Goesswein, "The Glems Vallez Bridge", pp.159~180, Ingenieurbauwerke, IBW Talbrücken, Nr.4, 1987.3.