

장대레일화 된 교량의 축력거동특성 연구

A Study on the Characteristics of Axial Force
in Bridge with Continuous Welded Rail

김 두 환*

Kim, Doo-Hwan

한 광 섭**

Han, Kwang-Seob

Abstract

This study is to understand the characteristics of axial force behavior that operates to the part of continuous welded rail and to investigate the basic data for secure the structure's stability and retrofit of the track. To develop the FEM model that type of plate girder which is used in the domestic national railway among servicing railway type. It is to analyze the characteristics of axial force behavior according to equip of the expansion joint and support placing by using the axial force simulation in making the continuous welded rail. As the result of research on the parametric valuables through the analysis, it is investigated that 'FMFM type' is more efficient than the other support type.

Also, it conclude that structures are having the expansion joint is the most safe condition.

Keywords : Axial Force, Continuous Welded Rail, Plate Girder, Expansion Joint.

1. 서 론

철도는 공익사업으로 다량의 여객과 화물을 장거리에 안전, 신속, 정확하게 경제적으로 수송하여 공공의 편리, 국토의 개발, 산업의 발전을 도모한다. 철도수송은 다른 교통기관에 비하여 안전성, 대량성, 고속성, 확실성, 쾌적성, 저공해성 등의 장점⁽⁵⁾을 가지며 현재

는 경의선 및 동해선 복원사업이 추진 중에 있어 남북 한에서 유럽을 잇는 철도 노선의 실현이 현실로 다가 오고 있다.

최근에는 국제적으로 고속철도를 건설하는 추세이며, 우리나라에서는 고속철도의 부설과 일반철도, 지하철도의 추가부설로 인하여 철도가 제2의 부흥기를 맞고 있다.

* 정회원 국립 서울산업대학교 구조공학과 교수

** 국립 서울산업대학교 구조공학과 석사과정

E-mail :han-ks@snut.ac.kr 011-9865-2182

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2003년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이와 같이 철도에 대한 중요성이 부각됨에 따라 많은 이들이 철도에 관련된 기술의 개발과 향상^{(1),2),(3),(4)}에 관심을 기울이고 있다. 또한, 철도관련기술의 발전과 철도 노선의 양적 증가에 따라서 철도 궤도에 관련된 연구가 진행중이며 여러 가지 문제점이 제기되고 있다.

이러한 철도에서는 레일의 이음매가 궤도에 있어서 최대의 약점이며, 이음매판과 볼트로 견고하게 체결하고 있으나 강성이 균일할 수는 없고 온도변화에 따라 이음매 유간이 생겨 이곳을 차량이 주행하면서 충격과 동요를 발생시킨다. 이 같은 이음매는 그 보수에 있어서 많은 비용이 필요할 뿐만 아니라 차량의 주행으로 인한 충격과 동요에 의하여 궤도재료 및 차량부품의 수명단축, 승차감 악화, 궤도파괴를 가속하고 있음은 물론 열차의 발착 등의 환경에도 악영향을 끼치고 있어 궤도의 장대레일화가 필수적이다.

교량상 장대레일 화에 따른 문제점을 해결하기 위해서는 체결장치 시스템의 검토 및 레일과 침목, 침목과 교량의 거더, 거더와 받침과의 온도차이 및 작용력에 의한 상호작용의 해석이 필요하다.

본 연구에서 유한요소해석법을 이용하여 궤도구조물을 모형화 하는 데에는 3차원 보요소와 스프링 요소를 적용한다. 3차원 보요소는 레일과 교량상판, 교각 등의 모형화에 적용되며, 스프링 요소는 다시 선형 또는 비선형 거동특성을 갖는 요소로 분류하여 도상의 모형화에는 비선형 스프링 요소를 적용하고 교량받침이나 지반강성의 모형화에는 선형 스프링 모델을 이용하였고, 지점배치 방식, 신축이음매의 설치 유무, 등의 해석 조건들을 변경해 가면서 교량상의 장대레일의 축력 거동 특성을 알아보고자 하였다.



(가) 보통레일 (나) 장대레일

Fig. 1 보통레일과 장대레일

2. 장대레일과 신축이음매

2.1 장대레일

궤도의 3대 약점부는 이음매부, 분기부, 곡선부이며 이 중 이음매부는 최대 약점부로서 차량이 이음매부를 통과할 때마다 생기는 충격으로 말미암아 도상이 이완되고 이음매의 처짐과 끝닿음이 생기며 재료의 손모를 촉진하는 것은 물론 차량의 불쾌한 충격 진동 및 소음을 막을 수 있는 대책이 없으며 보선작업 중에서 이음매부 작업에 투입하는 노력이 큰 비중을 차지하고 있다.

중전에는 레일의 온도 신축이 길이에 비례한다고 생각하여 이음매부를 연결용접하여 유간이 없어진다고 가정하면 온도 상승에 따르는 레일 신축량의 팽대를 처리할 수가 없으므로 레일 이음매부의 존재는 불가피한 것으로 믿어왔다. 그러나 많은 실험에 의하여 궤도에 부설된 레일은 레일 끝에서 50~100m 이상의 길이가 되면 종래의 이론과는 달리 길이에 정비례하여 신축하는 것이 아니라 도상저항 등에 의하여 자유로운 신축이 억제되어 있으므로 200m 이상의 긴 레일에서는 레일 양끝에서 각각 50~100m 범위 내에서는 온도의 영향으로 신축을 하지만 그 안쪽 중앙부는 이른바 부동구간을 형성하여 그 길이에 관계없이 신축하지 않는다는 것을 알게 되었다.

2.2 신축이음매

장대레일은 전 선로를 한 개의 긴 장대레일로 하는 것이 가장 이상적이겠지만 앞에서 설명한 장대레일의

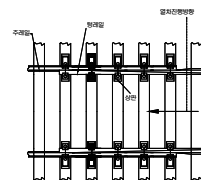


Fig. 2 신축이음매

부설 조건을 충족하지 못하거나 특히 곡선에서의 레일 마모시 유지보수의 어려움 등 때문에 레일 중간 중간에 신축이음매를 둔다. 한국 철도에서는 다음 Fig. 2와 같이 입사각이 없는 텅레일과 궤간의 변화와 충격을 주지 않으면서 신축량을 흡수하도록 하고 있다.

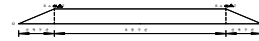


Fig 4 최고 레일 온도시의 축력분포

2.3 온도변화와 장대레일

온도의 변화 시 레일이 자유 신축하는 조건에서는 온도 변화에 따른 응력이 발생하지 않을 것이나 레일은 체결장치로 침목에 체결되어 있으며, 레일 이음매 판에 의해서 종방향 신축이 구속되고 있다.

실제 자갈도상궤도에 있어서 레일은 완전고정상태나 자유신축상태가 아니라, 체결장치, 침목 및 도상자갈에 의해 지지되어 있다. 이러한 구조계에서 레일의 이동에 큰 영향을 미치는 인자는 자갈도상과 침목간의 저항력이다. 궤도의 종류에 따라 다르지만, 슬래브궤도 및 직렬궤도에서는 침목과 도상간의 저항력보다 레일과 침목간의 저항력이 작으므로 레일과 침목간의 저항력이 거동에 큰 영향을 미치게 된다.

여러 연구자들에 의해 행해진 실험결과에 따르면 도상중저항력과 침목이동량과의 결과는 실제로는 곡선의 형상을 갖지만, 정밀한 축력 및 이동량의 계산에는 주로 탄성-완전소성 거동을 하도록 모형화 하는 경향이 있다. 도상중저항력의 최대치는 궤도구조, 도상체결 상태에 따라 다르며 일반적으로 항복시의 침목이동량은 보통 2~5mm 정도이다.⁽³⁾

이러한 도상중저항력의 특성을 고려할 때 양단이 자유 신축할 수 있는 장대레일의 도상저항력을 고려한

장대레일 설정 후의 온도변화에 따른 축력분포는 레일 단부의 신축구간과 변위가 전혀 발생하지 않는 부동구간의 특성이 조합되어 나타난다.

장대레일의 양단부는 레일의 온도신축이 일어나는 부분이며, 이 부분을 신축구간이라 하고 레일의 온도신축이 없는 중앙부를 부동구간이라고 한다.

3. 해석모델

3.1 개요

본 연구에서는 장대레일 축력거동 해석 프로그램을 FORTRAN을 이용하여 작성하였다. 교량상의 장대레일 축력 문제에서 가장 큰 영향을 미치는 요인은 교량의 지간이며, 교좌장치의 가동성 여부, 하부구조의 강성 등에 따라 레일의 축력분포 및 교량 하부구조로 전달되는 힘이 크게 변화하게 된다.

이러한 교량상의 장대레일 문제를 해석하기 위하여 레일 및 교량상부를 모형화하기 위한 3차원 보요소와 체결장치나 자갈도상의 저항력을 모형화하기 위한 비선형거동을 하는 연결용 요소를 해석프로그램에 구현하였다.

3.2 해석프로그램

3.2.1 해석프로그램의 특징

본 논문에서 사용된 해석프로그램의 특징은 다음과 같다.

- (1) 3차원 보요소의 실행시 비틀림은 고려하나 전단변형의 강성이 표현 가능하다. 하지만, 레일의 전단변형은 무시 가능한 정도로 예상되므로 무시하고 해석한다.

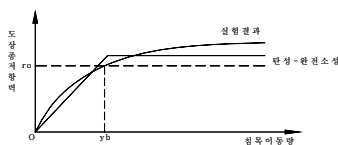


Fig. 3 도상중저항력의 특성

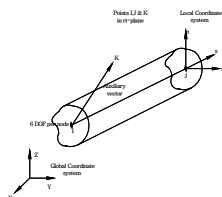


Fig. 5 3차원 보요소의 정의

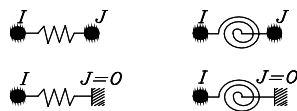


Fig. 6 FJOINT 요소의 정의

- (2) 정적해석은 하중의 정의를 시간 함수를 사용할 수 있으며, 비선형해석을 위하여 Newmark 적분법이 채택되고, 시간에 따라 변하는 하중의 점진적 재하가 가능하다.
- (3) 프로그램에서 사용 가능한 요소는 3차원 보요소, Flexible Joint Element, Winkler Joint Element의 3종류가 가능하다.

두 절점 간의 연결을 위하여 FJOINT 요소가 구현되었다. 이 FJOINT 요소는 3차원 공간에서의 3방향 이동과 3방향 회전에 대한 스프링의 조합으로 이루어진다. 또한, 이 FJOINT 요소의 정의 시 강성의 정의뿐만 아니라 동적해석을 위한 질량 및 감쇠장치의 정의가 가능하며, FJOINT를 정의하는 두번째 절점인 J절점의 값이 0의 값을 갖는 경우에는 지반에 견고히 고정되어 있는 경우로 간주하였다. 이 요소의 정의를 위하여 사용되는 절점 I와 J는 동일한 좌표를 갖는 절점이 가능하며, 요소의 국지좌표의 정의를 위하여 두 개의 벡터에 대한 입력이 요구된다.

선과 선을 연결하는 요소로서 WJOINT 요소가 정의되었으며, 보요소와 보요소간의 연결 및 보요소와 지반간의 분포된 지지조건의 정의에 사용될 수 있다. 이 요소는 다음과 같은 Winkler hypothesis에 의해 정의되었다.

$$\sigma(x) = Cw(x) = C(w_{upper}^h(x) - w_{lower}^h(x))$$

여기서, $\sigma(x)$, C , $w(x)$ 는 각각 F/L^2 , F/L^3

및 L 의 단위체계를 갖는다.

즉, 이 요소는 외관상의 정의에 있어서는 선에 연속 분포된 스프링처럼 보이나 실제요소의 정식화에 있어서 길이방향의 회전에 대한 저항성을 표현하기 위하여 면에 분포된 스프링으로 정식화하였다. 이를 위하여 연속 분포된 스프링의 폭(B)에 대한 정보의 입력이 요구된다. 이 요소의 정의에 있어서 절점 K와 L의 값이 0의 값을 갖는 경우 이들 절점이 견고한 지반에 고정되어 있다고 간주한다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 요소의 정식화에 있어서 윗부분의 선은 절점 I와 J에 의해 정의되고, 아랫부분의 선은 절점 K와 L에서 정의된다.

WJOINT를 구성하는 분포된 스프링은 국지좌표계의 3방향의 독립된 분포스프링으로 구성되어 있다.

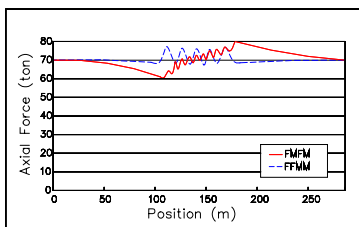


Fig. 7 WJOINT 요소의 정의

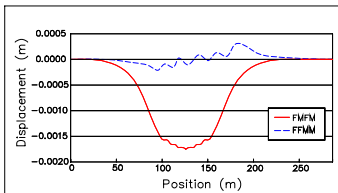
3.2.2 해석프로그램의 개략적 흐름도

본 연구에서의 해석프로그램은 비선형 Newmark 계열 알고리즘에 근거하여 작성되었으며, 해석프로그램의 개괄적인 흐름도는 Fig. 8에 나타난 바와 같다.

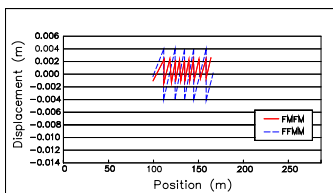
온도의 조건은 초기온도를 0℃로 하여 최대·최소 온도를 45℃까지 증가 또는 감소시키는 방법이며, 레일은 $50kgN_{RAIL}$ 을 사용하였고, 장대레일의 부동구간을 고려하기 위하여 교량 시·종점부로부터 도상구간을 100m씩 설정하였으며, 신축이음매는 교대의 영향을 고려하여 교대 끝으로부터 20m 떨어진 곳에 위치한 것으로 가정하고, 지점배치는 FMFM방식과 FFMM방식 두가지 조건으로 해석을 수행하였다.



(a) 축력비교



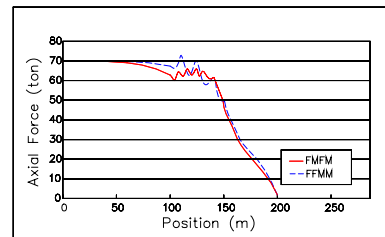
(b) 변위비교



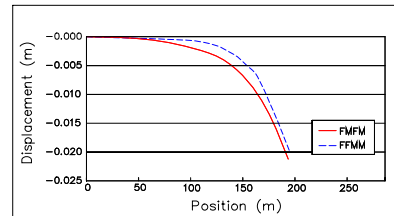
(c) 상대변위비교

Fig. 11 지점조건에 따른 온도하중해석

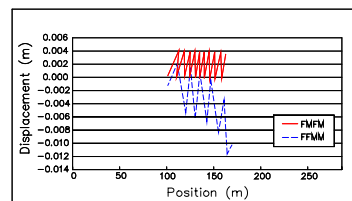
FMFM방식은 최대·최소축력이 교량의 종점과 시점에서 나타나고 축력이 점차적으로 증가함을 볼 수 있는데 FFMM방식은 이동지점이 위치한 교각부의 레일에 최대축력이 발생하고 있다. 이때의 레일변위는 FMFM방식이 더 작은값을 나타내고 있으나 레일과 거더간의 상대변위를 살펴보면 FMFM방식이 더 작기 때문에 지점배치 방식에 있어서는 FMFM방식이 다른 방식에 비하여 안정적인 것으로 판단되어진다.



(a) 축력비교



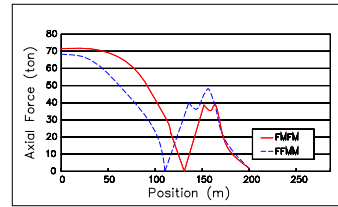
(b) 변위비교



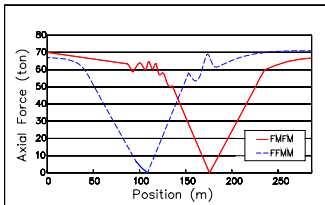
(c) 상대변위비교

Fig. 12 신축이음매를 설치한 경우 온도하중해석

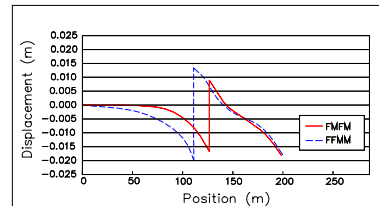
Fig. 12는 교량의 종점부로부터 20m 떨어진 도상 구간에 신축이음매 설치를 가정하였을 경우의 해석결과이다. Fig. 11과 비교하여 볼 때 Fig. 12는 교량의 종점부에서 최대였던 레일축력이 신축이음매를 적용함에 따라 레일이 갖고 있던 내부에너지를 자유로운 신축을 통해 발산함으로써 레일축력이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 또한 신축이음매가 있는 끝단의 레일변위는 대략 20cm 정도였으며, FMFM방식일 때 상대변위가 FMFM방식보다 더 큰 경향을 보여준다.



(a) 축력비교

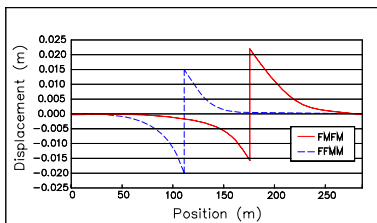


(a) 축력비교



(b) 변위비교

Fig. 14 신축이음매를 설치한 경우 레일 파단시 개구량



(b) 변위비교

Fig. 13 레일 파단시 개구량

Table 1 해석결과

교량형식		축력(ton)			파단시 개구량 (mm)
지점조건	구분	최대값	최대값	최소값	
FMFM	양단고정	78.96	2.6	2.1	39.3
	신축이음매	70.35	4.3	0.3	26.1
FFMM	양단고정	77.23	4.3	4.7	34.8
	신축이음매	72.76	2.4	10.6	33.7

Fig. 13과 Fig. 14는 신축이음매의 여부에 따라 각각의 경우에 최대축력이 작용하는 곳에서 레일파단이 발생하였을 때를 가정하여 해석한 결과이다.

이때의 개구량을 보면 신축이음매가 설치된 교량에 설치되지 않은 교량에 비해 개구량이 작음을 볼 수 있다. 이는 신축이음매의 영향으로 축력이 감소되었기 때문이라고 생각된다.

이상과 같이 대상 교량에 대한 해석결과를 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 신축이음매의 적용여부에 따라 레일축력과 상대변위의 차이가 있음을 볼 수 있는데, 신축이음매를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 비교하면, FMFM방식은 축력 감소량이 적은 반면에 FMFM방식은 더 많은 감소를 보여주고 있다. 또한 파단시의 개구량은 축력이 큰 만큼 개구량이 크다는 사실을 관찰할 수 있었으며, 최대축력이 가장 작게 나타난 신축이음매를 설치한 FMFM방식의 경우가 개구량이 가장 적은 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 장대레일화 된 교량의 궤도에 작용하는 레일의 축력거동특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지점조건에 따른 해석에서 축력과 거더와 레일간의 상대변위를 비교하여 보면, 레일축력이 FMFM방식일 경우 교량의 시점과 끝점에서 최소 및 최대임을 나타내고 있고, FFMM방식에서는 이동단이 있는 교각부의 레일축력이 최대의 인장력을 받고 있음을 살펴볼 수 있으며, 상대변위는 FMFM방식이 FFMM방식보다 상대적으로 변위가 작음을 보여주고 있다.
- 2) 신축이음매의 적용여부에 따라 레일축력과 상대변위의 차이가 있음을 볼 수 있는데, 신축이음매를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 비교하면, FFMM방식은 축력 감소량이 적은 반면에 FMFM방식은 더 많은 감소를 보여주고 있다.
- 3) 파단시의 개구량은 축력이 큰 만큼 개구량이 크다는 사실을 관찰할 수 있었으며, 최대축력이 가장 작게 나타난 신축이음매를 설치한 FMFM방식의 경우가 개구량이 가장 적은 것으로 나타났다.
- 4) 교량의 지점조건은 FFMM 방식보다 FMFM 방식이 구조물의 안전성 측면에서 더 효과적이며, 신축이음매를 설치했을 때 가장 안전한 것으로 판단되어진다.
- 5) 본 논문의 해석기법과 연구방법은 철도교의 장대레일화 영향분석에 동일하게 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 장대레일과 구조물의 상호작용에 대하여 해석결과와 실제거동의 차이를 확인하는 등의 검증과정이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 서울산업대학교 학술연구지원비에 의하여 수행되어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 서사범, “철도공학의 이해”, 열과알, 2000.
2. 한국철도기술연구원, “포항제철소내 철도계량기 시스템 신설을 위한 안전성 평가용역(레일)보고서”, 1999.
3. 한국철도기술연구원, “경부 고속철도 기존선 활용에 따른 관형교 장대레일 부설 및 장대레일 관리방안 연구”, 2000.
4. 李種得, “鐵道軌道力學”, 노해출판사, 2000.
5. 李種得, “鐵道工學”, 노해출판사, 1999.
6. William Weaver Jr. and James M. Gear, “Computer Programs for Matrix Analysis of Framed Structures” 3rd Edition, Van Nostrand Reinhold, 1990.
7. Klaus-Jürgen Bathe, “Finite Element Procedures” International Edition, Prentice-Hall, 1996.
8. John Argyris and Hans-Peter Mlejnek, “Dynamics of Finite Element Analysis” 3rd Edition, Wiley, 1989.
9. Darly L. Logan, “A First Course in the Finite Element Method” 2nd Edition, PWS Publishing Company, 1993.

(접수일자 : 2002년 12월 16일)