

교량상 궤도축력의 해석 및 실측결과 비교

The Analysis and Field Measurement of Longitudinal Track Forces for Long Railroad Bridges

강기동* · 박종방** · 김인재*** · 박대근***

Kang, Kee Dong · Park, Jong Bang · Kim, In Jae · Park, Dae Geun

Abstract

The design of railroad bridges differs from road bridges because of the interface between track structure and bridge structure. The track generally consists of Continuous Welded Rail(CWR) which is fixed by fasteners to the sleepers embedded in the ballast. The ballast provides the interface between the track structure and the bridge structure. Large longitudinal forces can develop from the temperature variation in rail and bridge structure. These longitudinal forces are specially important for long bridges because the bridge layout for span length, pier dimensions and arrangement and type of bearings can be governed by these forces. This report provides a comparison of longitudinal track forces determined by analysis and actual measured track forces. In recent practice the longitudinal track force for European railways is analyzed using a finite element analysis method. This method is very time-consuming and requires the detail design of the bridge to be complete. Redesign is required if the design criteria for longitudinal track forces are not satisfied. There is a need to develop a simple analysis method considering the large number of bridge structures and a relatively short design time on the Korean High Speed Rail Project. The analysis results presented herein, based on a simplified analysis, show good agreement with those obtained by finite element analysis, as well as with those measured on an actual track. The proposed analysis method is particularly useful for the preliminary design of bridge structures.

요 지

철도교량은 도로교량과는 달리 궤도가 부설되어 있고 일반적으로 이 궤도는 레일을 연속적으로 용접하여 침목위에 고정시키므로 온도변화에 따라 종방향으로 큰 힘이 작용하게 된다. 따라서 철도교량의 설계는 수직방향의 열차하중 뿐만 아니라 종방향의 궤도축력을 고려하여야만 하고, 특히 장대교량의 경우 교량형식, 경간, 교각단면, 지점배치방법 등의 결정은 궤도축력에 의하여 지배된다. 본 연구는 교량상의 궤도축력에 대하여 이론적인 해석을 하고, 이 해석방법을 고속철도 교량설계에 이용할 수 있도록 하기 위하여 장대레일이 부설되어 있는 철도교량에서 궤도축력을 실측하여 이론해석결과치와 비교하였다. 최근 유럽철도에서는 궤도의 종방향해석모델을 유한요소로 하여 개발된 해석방법이 사용

* 정회원 · 한국고속철도건설공단 건설본부 궤도국 국장

** 정회원 · 한국고속철도건설공단 건설본부 궤도국 과장

*** 정회원 · 한국고속철도건설공단 건설본부 궤도국

되고 있으나, 이 방법은 입력에 많은 시간이 소요되고 교량구조물의 세부설계가 완료되어야 하므로 계산결과 장대레일 허용응력이 만족되지 않을 때는 교량설계를 다시 해야 하는 등 교량의 설계 과정상 불편한 면이 많다. 따라서 일시에 수많은 교량의 형식에 대한 검토가 필요한 경부고속철도의 프로젝트의 경우 좀더 간단한 해석방법의 개발이 필요하게 되었다. 이 방법에 의한 해석결과는 유한요소법에 의한 해석결과치와도 큰 차이가 없으며, 또한 운행선상에서의 실측결과와도 잘 일치하므로 교량의 예비적인 설계에 매우 유용한 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

1. 서론

고속철도의 궤도는 열차의 고속주행을 위하여 매끄러운 주행로를 유지하여야 할 뿐만 아니라 승차감을 좋게하고, 소음·진동을 감소시키기 위하여 레일이음매를 용접하여 장대레일을 부설하고 있다. 그러나 장대레일을 부설하게 되면 레일의 온도변화에 따라 궤도축력이 발생하게 되며 어느 한계를 넘게 되면 레일의 파단 또는 횡방향으로 변위(좌굴)를 일으키게 된다. 따라서 이에 대한 역학적 해석 및 설계기법과 레일용접기술의 발전없이 장대레일부설이 불가능하게 된다. 일반적으로 토공구간에서의 장대레일 좌굴문제는 종방향과 횡방향으로 검토하고 있으나 곡선구간에서는 주로 횡방향 좌굴이 문제가 된다. 그러나 장대교량이나 고가교 등은 구조물의 종방향 신축때문에 궤도에 발생하는 종방향축력의 문제는 더욱 복잡하게 된다. 이때 궤도축력은 장대교량의 경우 교량구조물 자체의 교축방향 신축량이 크게 되므로 종방향의 축력이 궤도좌굴을 지배하게 된다.

철도교량상에 장대레일을 전면적으로 부설한 것은 일본의 동해도 신간선이었는데 1964년 200 km/h의 고속운전을 실현하였다.⁽¹⁾ 유럽철도의 장대레일부설에 관하여는 L. Fryba의 논문에 상세히 기술되어 있다.⁽²⁾ F. Bijl은 네덜란드 철도의 보선규정을 만들기 위하여 교량상 장대레일의 궤도축력해석 모델을 제시하였다.⁽³⁾ 유럽철도연맹(UIC)산하 연구기관인 ORE에서는 1985년 구조물과 궤도의 축력작용에 관한 종합적인 연구보고서를 작성하였다.⁽⁴⁾ 1992년 네덜란드의 M.A. Van 등은 유한요소법에 의한 교량상 장대레일의 궤도축력계산 프로그램을 개발하였다.⁽⁵⁾ 이 프로그램은 궤도축력 뿐만 아니라 교각의 강성과 거더의 종방향거동을 함께 해석할 수 있으며,

특히 도상저항력의 비선형특성을 고려한 해석이 가능하고 체결구의 기능에 대한 연구에도 활용될 수 있다.⁽⁶⁾ 그러나 입력에 많은 노력이 필요하고 계산 시간이 오래 걸리며, 입력을 위하여는 먼저 구조물의 세부설계가 완료되어야 하므로 교량의 형식, 지간, 지점배치방법 등에 대한 예비적인 판단을 위하여는 불편한 점이 많다. 경부고속철도와 같이 430 km에 달하는 긴 연장에서 일시에 수많은 구조물에 대한 장대레일 축력문제를 검토하기 위하여는 좀 더 간단한 해석방법이 필요하다.

본 연구는 경부고속철도의 교량구조물상에 장대레일을 부설하기 위하여 간단한 해석이론을 개발하고 이 이론식에 의한 해석결과를 유한요소법에 의한 해석결과와 비교하였으며 실제의 철도운영선에서 궤도의 종방향축력을 측정하여 그 결과를 검증하였다.

2. 궤도축력 이론

2.1 일반구간

장대레일은 온도변화가 있다라도 레일체결장치, 침목 및 도상에 의해 그 이동이 억제되므로 이에 상당하는 에너지가 레일축력으로 작용하게 된다.

$$P = EA\beta(t - t_0) \quad (1)$$

여기서,

P : 레일축력(ton)

E : 레일강의 탄성계수(2.1×10^6 kgf/cm²)

A : 레일의 단면적(cm²)

β : 레일강의 선팽창계수(1.14×10^{-5} /°C)

t : 장대레일 온도(°C)

t₀ : 장대레일 부설온도(°C)

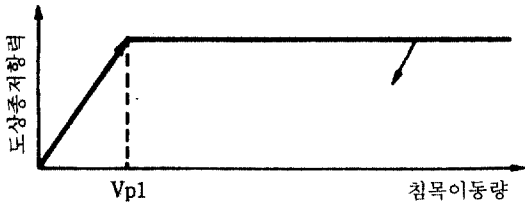


그림 1. 도상종저항력

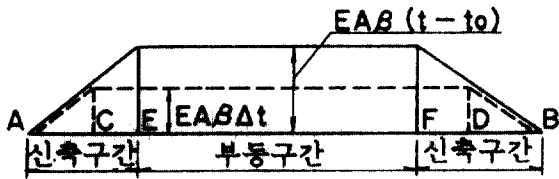


그림 2. 장대레일 축력분포

온도변화에 따른 레일의 이동은 레일과 침목, 침목과 도상에서 저항을 받지만 레일과 침목은 이중 탄성체결을 하여 저항력이 매우 크기 때문에 침목과 도상간의 저항력에 지배된다. 레일길이 방향의 이동에 저항하는 힘, 즉 도상저항력은 그림 1과 같이 일정한 수준까지는 탄성적으로 변형하지만 그후는 소성변형하여 변위량에 관계없이 일정하게 되며, 이때의 침목이동량은 2~5 mm 정도가 된다.

그림 2에서 A~E, F~B간에서는 레일신축이음매의 영향으로 레일은 온도변화에 따라 신축하게 되며 도상으로부터 저항을 받지만 E~F간은 온도변화에 의해 신축하지 않으며 종저항력도 작용하지 않는다. 즉, 일반구간의 장대레일은 장대레일 단부로부터 어느 정도(약 100~150 m)까지는 온도변화에 따라 신축하지만 그 이상의 안쪽의 레일은 도상의 구속으로 인하여 신축하지 않고 본래의 길이를 유지하게 된다.

2.2 교량구간

장대레일을 교량상에 부설하면 그림 3과 같이 온도변화에 따라 교량거더가 신축하기 때문에 이로 인한 축력이 추가로 레일에 작용하며 그 반력으로 교량거더와 교각에는 종하중이 작용된다. 교량거더의 고정지점 부근에서는 궤도축력이 감소되지만 이동지점 부근에서는 거더신축량만큼의 도상변형이 발생하므로 궤도축력이 부가된다. 일반적으로 장대레일이 부설된 철도교량은 궤도축력 때문에 발생되

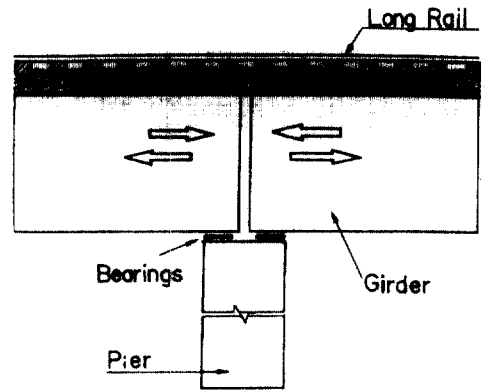
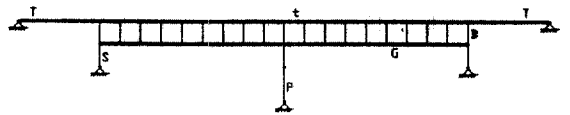


그림 3. 교량구간의 궤도축력작용



- : 절점
- t : 궤도요소(2-레일)
- T : 장대레일 요소
- B : 도상요소
- G : 교량요소
- S : 지점요소
- P : 교각요소

그림 4. 유한요소 모델

는 레일응력에 의해서 교량의 형식,지간길이, 지점 배치방법 등이 결정된다. 특별한 경우 교량전후부에 레일신축이음매를 설치하여 이 한도를 크게 하고 있으나 고속열차의 승차감이나 궤도의 유지관리 등의 문제점 때문에 가능한 레일신축을 두지 않는 것이 바람직하다.

3. 교량상 궤도축력의 해석

3.1 개요

교량상의 장대레일 축력의 해석은 그림 4와 같이 교량과 장대레일을 전체구조요소로 모델링하여 궤도축력을 계산하는 방법(유한요소법)과 그림 5와 같이 교량상의 레일이동량과 거더이동량이 일치하는 점(0점)을 가정하여 레일신축량과 축력의 연속성으로부터 방정식을 세운다음 이 방정식의 해를 구하여 궤도축력을 계산하는 방법이 있다.

그림 4의 방법은 장대레일축력 뿐만 아니라 교각의 강성이나 교량의 종방향거동을 함께 해석할 수

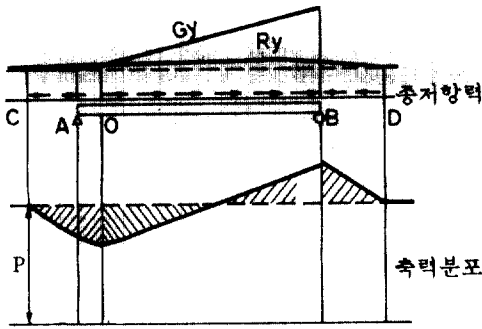


그림 5. 종저항력의 작용과 축력분포

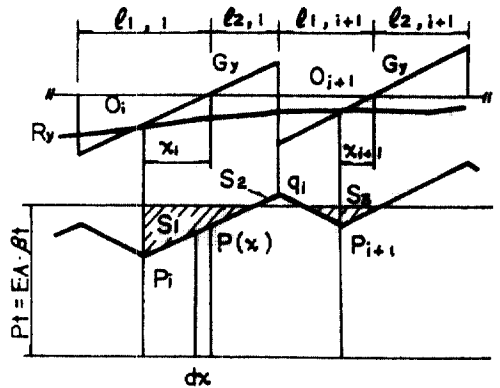


그림 7. 일치점과 축력분포의 관계

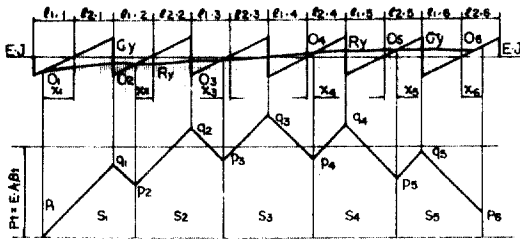


그림 6. 일치점의 가정과 축력분포

있고, 도상의 비선형거동과 체결구의 기능 등을 연구하는데도 유효하게 사용될 수 있다.

레일의 신축량과 축력의 연속성으로부터 축력을 계산하는 방법은 교량형식, 지간, 지점배치방법 등만 가정하면 교량의 세부적인 설계내용이 없이도 축력 계산이 가능하므로 교량의 예비설계단계에서 유효하게 사용될 수 있다.

3.2 궤도축력의 해석

그림 6에서와 같이 각 거더상에서 일치점이 존재하는 경우 축력분포도의 정점과 저점을 각각 p_i ($i=1 \sim m$), q_i ($i=1 \sim m-1$)로 하면 축력은 각각 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 0 & (a) \\
 q_1 &= r(x_1 + l_{2,1}) & (b) \\
 i &= 2 \sim m-1 \text{에서는} \\
 p_i &= q_{i-1} - r(l_{1,i} - x_i) \\
 &= r\{x_1 + 2(x_2 + \dots + x_{i-1}) + x_i\} + L_{p,i} & (c) \\
 q_i &= p_i + r(x_i + l_{2,i}) \\
 &= r\{x_1 + 2(x_2 + \dots + x_i)\} + L_{q,i} & (d) \\
 p_m &= q_{m-1} - r(l_{1,m} - x_m) & (e)
 \end{aligned}$$

$$\text{단, } L_{p,i} = r \sum_{k=1}^{i-1} (l_{2,k} - l_{1,k+1})$$

$$L_{q,i} = r \left\{ \sum_{k=1}^i l_{2,k} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{1,k} \right\}$$

여기서, n : 가정한 일치점의 수

m : 거더의 수 ($m = NL + n + NR$)

$l_{1,i}$: 고정받침의 좌측경간장

$l_{2,i}$: 고정받침의 우측경간장

x_i : 일치점

NL : 교량좌측의 일치점이 없는 거더수

NR : 교량우측의 일치점이 없는 거더수

EJ ~ O₁ 사이에서는 거더와 레일이 같이 이동하므로 축력은 0이다.

만약, 좌우 양단부근에서 일치점이 존재하지 않으면,

$$x_i = l_{1,i} (i=1 \sim NL)$$

$$x_i = -l_{2,i} (i = NL + n + 1 \sim m)$$

상기의 축력계산식에 대하여 레일과 거더의 이동량이 일치함에 따라 $n-1$ 개의 방정식이 세워지고 축력의 연속성에서 구한 방정식을 합하여 n 원의 연립방정식이 유도된다. 일치점과 축력분포의 관계는 그림 7과 같다.

그림 7에서 O_i ~ O_{i+1} 사이의 거더 이동량의 차는

$$\begin{aligned}
 G_y(O_i \sim O_{i+1}) &= \beta t(x_i - x_{i+1}) \\
 &= \frac{1}{EA} \{P_i - P(x)\} dx & (3)
 \end{aligned}$$

한편, 레일이 미소부분 dx 가 늘어난 량 Δl 는 온도변화에 의해 자유신축하여 늘어난 량 Δl 과 축력 $P(x)$ 에 의해 줄어든 량 $d'l$ 와의 차로부터 구할 수 있다.

$$d'l = \beta t dx$$

$$d'l = \frac{1}{EA} P(x) dx$$

$$\Delta l = \beta t dx - \frac{1}{EA} P(x) dx$$

$$= \frac{1}{EA} \{P_t - P(x)\} dx \quad (4)$$

따라서 $O_i \sim O_{i+1}$ 사이에서 레일이 늘어난 양은

$$R_y(O_i \sim O_{i+1}) = \int_{O_i}^{O_{i+1}} \Delta l$$

$$= \frac{1}{EA} \int_{O_i}^{O_{i+1}} \{P_t - P(x)\} dx \quad (5)$$

즉, 사선부분의 면적 ($S_1 - S_2 + S_3$)를 EA 로 나눈 값과 같다.

$$R_y(O_i \sim O_{i+1}) = \frac{1}{EA} \left\{ P_t(x_i + l_{2,i} + l_{1,i+1} - x_{i+1}) \right. \\ \left. - \frac{1}{2}(x_i + l_{2,i})(p_i + q_i) \right. \\ \left. - \frac{1}{2}(l_{1,i+1} - x_{i+1})(q_i + p_{i+1}) \right\} \quad (6)$$

레일과 거더이동량이 일치함에 따라 다음 식이 유도된다.

$$G_y(O_i \sim O_{i+1}) = R_y(O_i \sim O_{i+1}) \quad (7)$$

$\xi = 1 \sim n - 1$ 에 대하여

$$F_\xi = (x_i + l_{2,i})(p_i + q_i) + (l_{1,i+1} - x_{i+1})(q_i + p_{i+1}) \\ - 2P_t(l_{2,i} + l_{1,i+1}) = 0 \quad (8)$$

단, $\xi = 1 \sim n - 1$, $i = \xi + NL$

축력의 연속성에 의해 n 번째의 방정식이 유도된다.

$$F_n = p_n = 0 \quad (9)$$

식 (8), (9)에서 n 개의 식이 성립되며 이 연립방정식을 풀어서 일치점 $x_i (i = NL + 1 \sim NL + n)$ 가 구해지면 식 (2)로부터 축력을 계산한다.

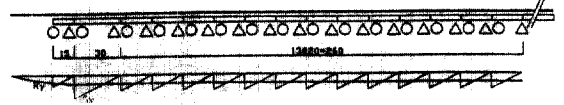


그림 8. 해석을 위한 교량

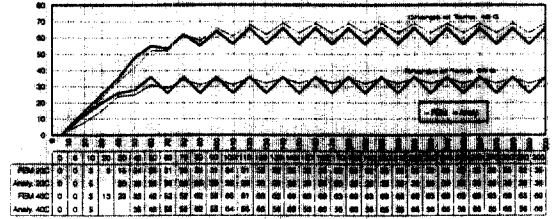


그림 9. 해석결과

3.3 해석프로그램 PROLIS 2.1

이 프로그램은 1992년 네덜란드 델프트공대에서 Van 등이 개발한 것으로 장대레일 축력 뿐만 아니라, 그림 4의 각 요소에 대한 하중과 변위 및 교각의 반력을 계산할 수 있으며, 열차의 시동 및 제동하중, 도상의 비선형 특성을 고려한 해석이 가능하다.

3.4 해석예

그림 8의 교량에 대하여 궤도축력을 계산하였다. 이 교량은 현재 전철이 운행되고 있는 운행선으로서 실측치와 비교하기 위하여 이 교량을 해석의 예로서 택하였다. 이 교량에 대하여 유한요소법과 3절의 그림 5와 같은 궤도축력 해석모델로 궤도축력을 해석하였으며, 해석결과는 그림 9와 같다. 온도변화가 적은 경우에는 두 방법에서 축력의 최대치가 같더라도 하한치의 값은 다르나, 큰 온도변화에서는 하한치에서도 축력분포가 비슷함을 알 수 있다. 이것은 온도변화가 적으면 궤도축력이 적게되어 유한요소법해석에서는 궤도축력에 대한 교량의 강성영향이 상대적으로 크게 되나 온도변화가 크면 교량 강성의 영향이 그다지 크지 않기 때문이다.

4. 철도운행선에서의 실측

4.1 측정개요

이론식에 의한 축력계산치와 실측치에 대한 비교 분석을 위하여 서울지하철 2호선 건대역~구의역간 선로에서 레일축력을 측정하였다. 측정구간의 교량



사진 1. 측정구간 교량현황

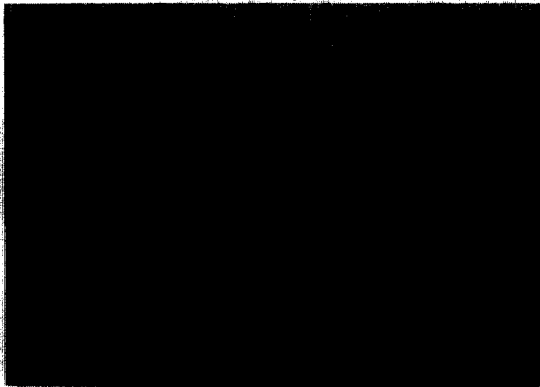


사진 2. 측정구간 선로현황

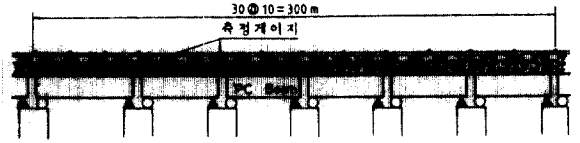


그림 10. 측정구간의 선로 및 측정위치



사진 3. 레일축력측정기

표 1. 측정구간의 교량 및 선로구조

측정 구간	지하철2호선 건대~구의역 9 km735~10 km035(300 m)	
교량	하부구조	말뚝기초 T형교각
	상부구조	단순합성형(30 m×1) 단순PC빔(20 m×49)
	지점배치	FM방식
선로	선형	직선(180 m)+곡선(R=800 m)
	도상두께	27 cm(강자갈+잣자갈)
	침목	PC침목(2.4 m)
	체결장치	Pandrol+5 mm EVA패드
	레일	50 kg/m N(장대레일)

승강장 종점에 EJ가 설치되어 있으며 수평구간이고 선형은 직선이다. EJ로부터 약 180m이격된 지점부터는 선형이 곡선(R=800 m)을 이루고 있다. 궤도

축력의 측정은 EJ로부터 매 10 m마다 레일에 게이지를 부착하여 300 m되는 구간까지 시행하였다. 측정은 2회에 걸쳐 실시하였는데 온도차 18℃ 일 때의 온도하강시(기준레일온도 16℃, 측정레일온도 -2℃)와 온도차 22℃ 일때의 온도상승시(기준레일온도 0℃, 측정레일온도 22℃)에 측정하였다.

4.2 측정원리 및 방법

교량거더의 거동과 레일축력관계를 보다 확실하게 규명하기 위하여 그림 10과 같이 각각의 거더에 대하여 교각 직상부와 지간중앙점의 레일에 측정용 핀 2개 1조를 약 10 cm 간격으로 부착하였다. 레일 신축량의 측정은 감도 1/1000 mm의 정밀측정기를 사용하여 핀 사이의 간격을 측정하였고 레일온도를 동시에 측정하였다. 레일축력은 이때의 측정온도와 측정길이를 기준치로 하여 온도변화가 생긴 후 측정된 온도차와 길이변화의 관계로부터 측정기 자체의 연산장치에 의해 계산된다.

4.3 측정결과 및 고찰

궤도축력의 실측결과와 이론적 해석결과를 그림 11, 12와 같다. 그림 11은 온도변화범위가 16℃에서 -2℃로 신축이음매부근에서 약 100 m 구간까지에

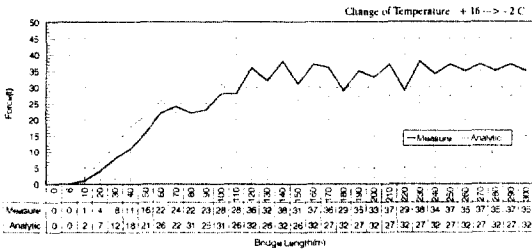


그림 11. 측정구간의 이론계산 및 실측결과(1)

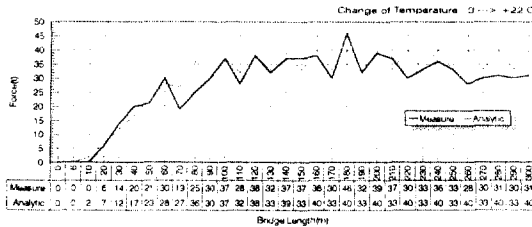


그림 12. 측정구간의 이론계산 및 실측결과(2)

서는 계산치는 실측치보다 축력이 작게 나타나고 있다. 그러나 100 m 이후의 부동구간에서는 실측치가 계산치보다 약 10~20% 상회하고 있다. 이것은 측정시기가 동절기로서 도상이 다소 동결되어 이에 의한 영향으로 도상저항력이 다소 큰 값이 된 것으로 추정된다. 그러나 축력분포 경향은 실측치와 유사한 것을 알 수 있다. 그림 12는 온도변화범위가 0°C에서 22°C로 다소 기온이 상승한 때의 측정 케이스이다. 축력의 분포가 신축이음매로부터 180 m 지점에서 급격한 증가치가 나타나고 있으나 이는 국부적인 도상의 고결이나 궤도틀림 등의 영향인 것으로 추정된다.

상기의 측정결과는 궤도축력의 해석결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있으나 온도변화가 비교적 적은 범위에서 측정된 점을 감안하여 향후 측정온도를 설계한계치에 가까운 -20°C ~ +40°C 범위까지 측정을 계속하여 그 결과를 비교·검토할

예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 교량상에 부설된 장대레일궤도 축력을 레일의 신축량과 축력의 연속성으로부터 계산하고, 그 결과를 유한요소법에 의한 해석결과와 비교하였다. 또한 실제 철도교량에서의 실측결과와도 비교하였다. 이 방법에 의한 축력계산결과는 유한요소법에 의한 계산결과와 큰 차이가 없으며 실측결과와도 비교적 잘 일치한다. 따라서 교량상 장대레일 궤도축력의 한계만을 판단하여 교량의 형식, 지간길이, 지점배치방법 등을 결정하는 예비적인 설계단계에서는 본 방법이 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Fukazawa, Y. and Onishi, A., "A Very Long Rail Laid on Bridge", Permanent Way 15, Japan Railway Civil Engineering Association, 1962.
2. Fryba, L., "Thermal Interaction of Long Welded Rails with Railway Bridges", Rail International, 1985. 3.
3. Bijl, F., "Temperaturkräfte auf Brücken mit Durchgehenden Schienen", Report F 207 Utrecht, 1975.
4. ORE Question D101, "Interactions Between Track and Structures due to the Influence of Temperature in the case of Continuous Welded Rails Synthesis Report", Report No.28, 1985.
5. M.A. Van, P. Van Den Berg, "PROLIS 2.1", Delft University of Technology, 1992. 1.
6. 강기동, 서사범, 김인재, "도상저항력의 비선형 특성을 고려한 장대레일 궤도축력해석", 1993년도 대한토목학회 학술발표회 논문개요집, 1993.

(接受: 1994. 3. 21)