

철도교량의 동해석을 위한 하중모델의 개발

Development of Train Load Model for Railway Bridge Time-History Analysis

김 현 민* 오 지 택**
Kim, Hyun-Min Oh, Ji-Taek

ABSTRACT

A real train load fluctuates along the track because of complicated movements(Bouncing, Rolling, Pitching and Yawing) and rail conditions. This research has for its object in development of a numerical real train load model including fluctuation characteristics of lateral forces. It is based on Klingel movement theory of a wheelset on straight track. it presents a propriety of application by comparison between a 3D-Numerical analysis result using this train load model and a measured data. And this paper presents further study subject to improve a method about the train load modeling.

1. 서 론

철도교를 통과하는 열차하중은 도로교와 달리 일정한 궤도선상을 따라 주행하는 특성상 하중의 이동경로가 명확하다. 또한 주행열차의 종류가 한정적이기 때문에 실제 주행하중에 대한 시간이력해석을 수행하여 교량의 동적응답을 검토하는 것이 비교적 간단한 것으로 알려져 있다. 그러나 실제 주행하는 열차는 Bouncing, Pitching, Rolling, Yawing 등의 복잡한 운동을 수반하고 궤도상태에 따라 다양하게 하중이 변동되는 특성으로 인해 정확한 열차하중을 모델링하는데 어려움이 있다. 특히 철도교의 46%를 차지하는 판형교는 도상이 없이 궤도가 주형에 직결되는 형태로 교량의 동적 응답이 하중에 대해 민감하고 타 형식의 교량에 비해 횡강성이 매우 작아 횡방향에 대한 동적 응답 검토가 필요함에도 불구하고 횡압을 적용하기 위한 하중모델을 다룬 연구가 전무한 상태이다.

본 연구는 직선교에서의 차량의 횡방향 거동에 관한 이론적 모델과 현장에서 계측된 횡압 변동특성을 고려하여 하중모델을 개발하고 이에 대한 적용을 검토하는데 그 목적을 두고 있다. 하중모델은 Klingel Movement 이론⁽¹⁾으로부터 모형화 하였으며 하중모델의 타당성검증을 위해 철도교량의 3차원 유한요소 해석 결과와 현장실험에 의한 실측치를 비교하였다. 마지막으로 향후 최종적인 열차하중 모델 수립을 위해 연구방향에 관한 개선책을 제시하였다.

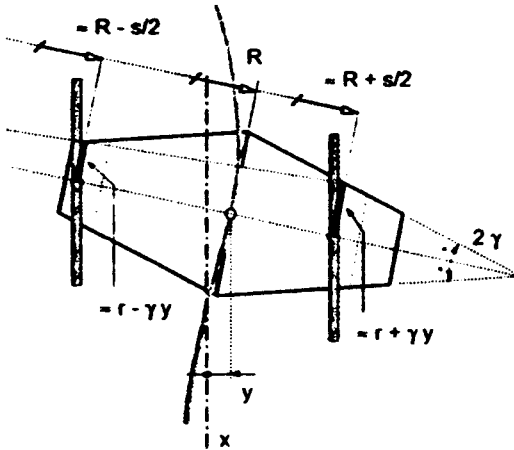
* 정회원, 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 주임연구원

** 정회원, 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 그룹리더

2. 열차하중의 변동특성

3.1 횡방향 거동의 이론적 모델

직선교량에 재하되는 열차하중의 횡압은 차륜과 레일 답면의 기하학적 형상으로 인해 주기적으로 변동되는 특징이 있다. 이러한 열차하중의 횡방향 거동은 Klingel Movement⁽¹⁾ 이론으로부터 수학적 모델링이 가능하다. 곡선부의 통과를 용이하게 하기 위하여 설치되어 있는 차륜의 답면 구배가 직선에서는 차륜과 레일사이의 접촉면에서의 차륜의 지름차이를 발생시켜 횡 이동 유간 (flangeway clearance)이 생기고 이에 의하여 2γ 의 접촉회전 반경의 차이가 발생하게 된다. 따라서 그림 1과 같이 곡선반경 R 의 횡방향 주기운동을 하게 된다.



여기서,

γ : 차륜답면경사

r : 차륜 반경 (중앙)

R : Klingel movement 경로에 따른 회전반경

s : 궤도간격

y : Klingel movement 경로의 횡방향 변위

v : 열차속도

그림 1 Klingel Movement

그림 1로부터 다음과 같은 기하학적 조건이 성립된다.

$$\frac{r + \gamma y}{r - \gamma y} = \frac{R + 1/2s}{R - 1/2s} \quad (1)$$

곡률은 식(2)와 같이 표현되며

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (2)$$

따라서 식(1)과 (2)에 의한 지배방정식은 다음과 같다

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2\gamma}{rs} y = 0 \quad (3)$$

$y(0) = 0$ 의 초기조건으로부터 지배방정식은 식(4)와 같이 표현된다.

$$y = y_0 \sin 2\pi \frac{x}{L} \quad (4)$$

$x = 0$ $x = 1$ $(0 \leq x \leq 1)$

$$N_1 = 2x_n^3 - 3x_n^2 + 1$$

$$N_2 = x_n \times L_e \times (x_n - 1)^2 \tag{9}$$

$$N_3 = -2x_n^3 + 3x_n^2$$

$$N_4 = x_n^2 \times L_e \times (x_n - 1)$$

또한 횡압의 경우 주행 중에 발생하는 변동특성을 고려하기 위하여 하중변동함수 $D(x)$ 를 곱하여 주기적인 하중변동 특성의 함수로 일반화하였다.

$$P_h(x) = Q_v \times N \times D(x) \tag{10}$$

4. 해석결과의 분석

변동특성을 고려한 하중모델의 타당성을 검증하기 위하여 현장계측결과와 본 하중모델을 적용한 3D 유한요소 해석결과를 비교하였다. 표 1은 해석을 위한 구조물의 제원과 열차의 제원을 표시하였다.

표 1 해석대상 구조물의 제원

분류	항목	제원
교량	설계하중	LS-22
	전장 (m)	19.6
	지간 (m)	18
	주형중심간 (mm ²)	2000
	복부판 (mm ²)	1600×12
	상부플렌지 (mm ²)	435×25 / 440×30 / 440×35
	하부플렌지 (mm ²)	435×25 / 440×30 / 440×35
레일	종류	KS60
	궤간 (mm)	1435
차량	차륜반지름(mm)	508
	답면경사	1/40
침목	크기 (mm)	230×230×2500

국철에서의 이론적인 Klingel Movement 주기(L_R)는 23.99m지만 실제 선로에서는 Hunting현상 등에 의해서 그 주기가 짧아진다. 따라서 이론적 주기에 대한 하중모델에 적용한 주기의 비율(T_r)을 매개변수로 하여 해석하고 계측과 가장 유사한 결과를 수치해석과 비교하였다. 표 2는 현장계측결과와 해석결과의 시간 이력에 대한 최대값을 비교한 것이다. 변동특성을 고려하지 않은 경우의 해석은 횡방향 응답이 거의 나타나지 않지만 변동특성을 고려하여 해석할 경우 계측결과와 매우 비슷한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다 그림 5

궤도틀림상태, 차량종류 및 주행조건에 따라 다양한 양상을 보이지만 그림 4와 같이 일반적으로 교량상에서 좌우진동을 하며 주행되는 것을 알 수 있다. 이 때 발생한 횡압의 최대 크기는 윤중의 25%까지 발생하였다. 이와 같은 실험적 결과로부터 횡압에 대한 변동특성함수를 주기하중으로 치환하는 것이 어느 정도 타당한 것으로 판단된다.

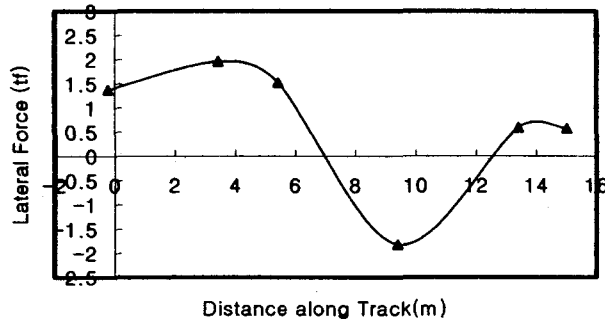


그림 4 선로위치에 따른 횡압분포

3. 열차하중의 모형화

교량의 레일선상으로 통과하는 열차하중의 시간이력을 구현하기 위하여 레일에 재하되는 윤중 및 횡압을 시간에 따른 등가절점하중으로 치환하였다. 여기서는 윤중 및 횡압과 이로 인한 모멘트하중만을 고려하였으며 직선교에서 큰 영향을 미치지 않는 비틀림하중은 고려하지 않았다.

다수의 집중하중으로 재하되는 열차하중의 시간이력을 해석에 적용하기 위해 먼저 각 축의 요소 내 위치를 Time Step마다 요소길이에 대해 무차원화하여 식(7)과 계산한다.

$$x_n = \frac{V_T \times T_n}{L_e} \quad (n = \text{Time Step}) \quad (7)$$

여기서, x_n 은 절점*i*로부터의 축위치

V_T 는 열차속도

T_n 은 시간

L_e 은 요소의 길이

임의 요소의 양단 절점 i, j 에서의 치환되는 절점 하중 및 절점 모멘트하중은 축중크기와 보로 모델링된 레일요소의 Shape Function^{(3),(4)}의 곱으로 나타낼 수 있으며 Time step마다 각 절점 별로 하중을 합산하여 하중의 시간이력을 나타낸다.

$$P(x) = Q_v \times N \quad (8)$$

여기서, y_0 는 교축방향 변위의 최대 진폭을 나타내며 L 은 Klingel Movement의 주기를 나타내며 주기는 차륜반경 r , 궤간 s , 차륜담면경사 γ 에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$L_K = 2\pi\sqrt{\frac{rs}{2\gamma}} \quad (5)$$

이를 적용하여 횡압변동에 대한 특성함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

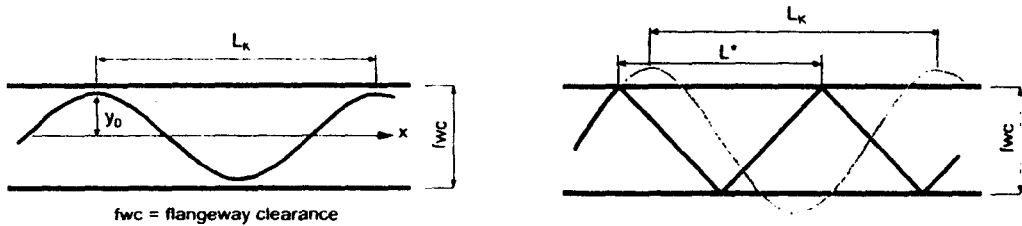
$$D(x) = R_f \cdot \sin 2\pi \frac{x}{L} \quad (6)$$

여기서,

$D(x)$: 횡압에 대한 변동특성함수

R_f : 윤중에 대한 횡압비의 최대값

그림 2는 Klingel Movement에 의한 열차하중의 횡방향 거동과 Hunting으로 인한 운동주기의 변화를 나타낸 것이다.



(a) Klingel movement

(b) Hunting movement

그림 2 열차하중의 횡방향 거동

3.2 횡압 및 횡압분포 측정

그림 3과 같이 교량구간 전후에 횡압게이지를 좌측에 8개, 우측에 1개를 설치하여 횡압 및 횡압분포 특성을 계측하였다.⁽²⁾

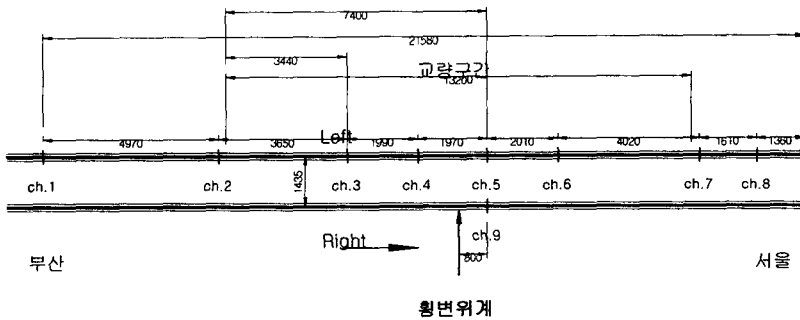
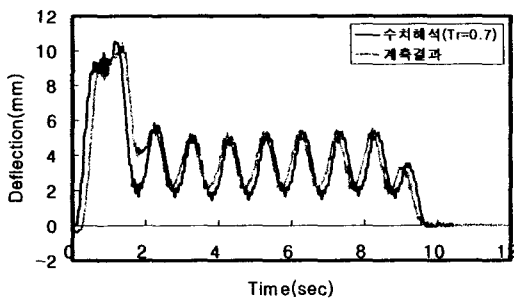


그림 3 횡압측정을 위한 횡압게이지 부착위치

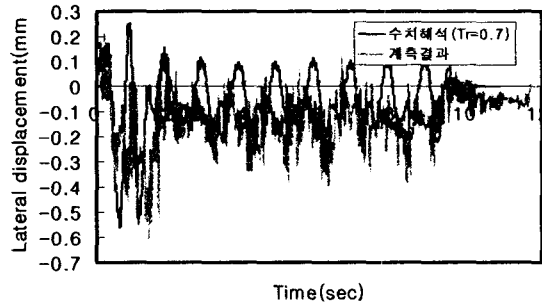
는 계측과 해석($T_r=0.7$)의 수직 처짐 및 수평 처짐에 대한 시간이력을 비교한 것으로 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

표 2 해석 및 계측결과의 최대응답 비교

	계측	해석 (정상운동)	해석 (변동운동 $T_r=0.7$)
수직처짐(mm)	10.46	10.22	10.54
수평처짐(mm)	0.61	0.05	0.563



(a) 수직처짐의 동적응답 비교



(b) 횡처짐의 동적응답 비교

그림 5 동적변위응답 비교

4. 결 론

Klingel Movement 이론과 횡압분포 측정실험에 근거하여 열차하중 모델을 개발하고 이를 이용한 해석 결과와 실험결과 비교로부터 타당성을 검토하였다. 변동을 고려한 하중 모델의 적용이 철도교량의 시간이력해석의 정확도를 높이는 것으로 확인되었으며 향후 레드틀립 등으로 인해 발생하는 비주기 변동특성을 고려한 하중모델의 보완이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Coenraad Esveld. **Modern Railway Track**, MTR-Production, 2001,p.19~21
2. 오지택외. **기존선의 속도향상에 대비한 판형교의 동적안정성 향상기술개발**, 한국철도기술연구원, 2003 ,p.148~151
3. Robert D. Cook외, **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**, Jon Wiley & Sons, 1989, p.99~101
4. 최진유, "무도상 판형교의 동적거동특성 분석을 위한 해석적 연구", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2002, p.1080~1085