

무도상 판형교의 횡거동 분석을 위한 주행하중 매개변수 연구 Parametric Study about Real Train Loading to Investigate Lateral Dynamic Characteristics of Steel Plate Girder Bridge

김현민* 오지택* 이소진**
Kim, Hyun-Min Oh, Ji-Taek Lee, So-Jin

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 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

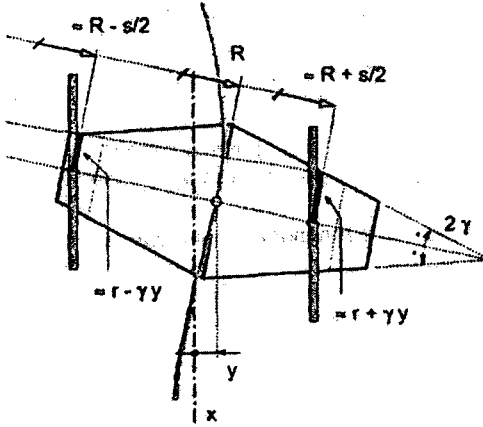
실제 주행하는 열차는 Bouncing, Pitching, Rolling, Yawing 등의 복잡한 운동을 수반하고 궤도상태에 따라 다양하게 하중이 변동되는 특성으로 인해 정확한 열차하중을 모사하는데 어려움이 있다. 특히 철도교의 46.8%를 차지하는 판형교는 도상이 없이 궤도가 주형에 직결되는 형태로 교량의 동적 응답이 하중에 대해 민감하고 타 형식의 교량에 비해 횡강성이 매우 작아 횡방향에 대한 동적 응답 검토가 필요함에도 불구하고 횡압을 적용하기 위한 하중모델을 다룬 연구가 전무한 상태이다. 본 연구는 직선교에서의 차량의 횡방향 거동에 관한 이론적 모델과 현장에서 계측된 횡압 변동특성을 고려하여 하중모델을 가정하고 이에 대한 적용성을 검토하는데 목적을 두고 있다. 하중모델은 Klingel Movement 이론⁽¹⁾으로부터 모형화 하였으며 하중모델의 타당성검증을 위해 철도교량의 3차원 유한요소 해석결과와 현장실험에 의한 실측치를 비교하였다. 또한 차륜 담면경사의 변화로 발생하는 횡압변동 주기가 횡거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 횡압주기 변화에 따른 매개변수 연구를 수행하였다.

2. 횡방향 거동의 이론적 모델

직선교량에 재하되는 열차하중의 횡압은 차륜과 레일 담면의 기하학적 형상으로 인해 주기적으로 변동되는 특징이 있다. 이러한 열차하중의 횡방향 거동은 Klingel Movement⁽¹⁾ 이론으로부터 수학적 모델링이 가능

* 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹, 정희원
** 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹

하다. 곡선부의 통과를 용이하게 하기 위하여 설치되어 있는 차륜의 담면 구배가 직선에서는 차륜과 레일사이의 접촉면에서의 차륜의 지름차이를 발생시켜 횡 이동 유간 (flangeway clearance)이 생기고 이에 의하여 $2\gamma y$ 의 접촉회전 반경의 차이가 발생하게 된다. 따라서 그림 1과 같이 곡선반경 R 의 횡방향 주기운동을 하게 된다.



여기서,

γ : 차륜담면경사

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.

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

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.

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

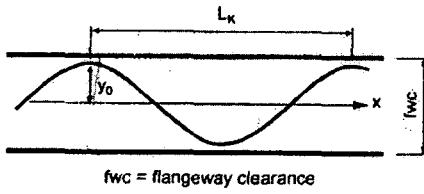
이를 적용하여 횡압변동에 대한 특성함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

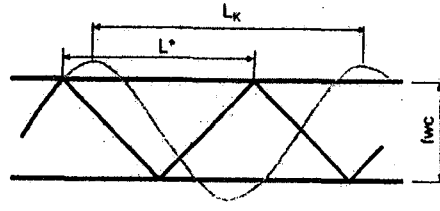
여기서, $D(x)$: 횡압에 대한 변동특성함수

R_H : 윤중에 대한 횡압비의 최대값

Klingel Movement에 의한 열차하중의 횡방향 거동과 일정속도 이상에서 관성력의 증가로 Rebounding됨으로써 발생하는 Hunting현상을 그림 2에 나타내었다.



(a) Klingel movement



(b) Hunting movement

그림 2. 열차하중의 횡방향 거동

3. 횡압의 수치적 모형화

교량의 레일선상으로 통과하는 횡압의 시간이력을 수치적으로 구현하기 위해 레일에 재하되는 횡압을 시간에 따른 등가절점하중으로 치환하였다. 여기서는 횡압과 이로 인한 모멘트하중만을 고려하였으며 직선교에서 큰 영향을 미치지 않는 비틀림하중은 고려하지 않았다. 다수의 집중하중으로 재하되는 열차하중의 시간이력을 해석에 적용하기 위해 먼저 열차의 각 하중의 요소 내 위치를 시간간격마다 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 하중의 크기와 Shape Function^{(3),(4)}의 곱으로 나타낼 수 있으며 Time step마다 각 절점 별로 하중을 누적 합산하여 하중의 시간이력을 나타낸다.

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

$x = 0$ $x = 1$

$(0 \leq x \leq 1)$

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

$N_2 = x_n \times L_e \times (x_n - 1)^2$

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

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

(9)

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

$$P_h(x) = Q_V \times N \times D(x) \quad (10)$$

4. 수치해석

Klingel Movement는 완전한 레일과 차륜 상태를 가정하여 산정되는 것으로 궤도틀림 및 차량-궤도-교량의 Interaction효과에 의한 비주기 변동특성을 포함한 실제 선로와는 많이 차이가 있다. 그러나 본 연구에서는 이상적인 선로상태 하에서 차륜의 마모 등에 의한 담면경사의 변화로 인해 발생하는 횡거동의 주기변화에 초점을 두고 매개변수 연구를 수행하였다. 먼저 횡압모델의 검증을 위하여 현장계측결과와 Klingel Movement이론모델을 사용한 횡방향 해석을 비교하였다. 도표 1은 대상교량 및 차량의 제원이며 도표 2에 해석치와 계측결과를 비교하였다. 본 이론모델에 의한 횡압을 고려하는 것이 수치해석의 정확도를 높임을 알 수 있다.

도표 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
	담면경사	1/40
침목	크기 (mm)	230×230×2500

도표 2. 해석과 계측결과의 최대응답 비교

	계측	해석 (윤증만 고려)	해석 (윤증, 횡압 고려)
수직처짐(mm)	10.46	10.22	10.54
수평처짐(mm)	0.61	0.05	0.563

Klingel Movement 주기에 대한 해석적용 주기의 비(R_T)를 0.5~1로 가정하여 수치해석을 수행함으로써 철도교량에 미치는 횡압 주기 변동의 영향을 살펴보았다. 해석대상 교량은 지간 18m의 실제 교량의 단순화된 모델을 사용하였으며 객차 및 화차로 구분하여 해석하였다. 또한 최대횡압의 크기는 직선교에서의 횡압측정 실험⁽²⁾에 근거하여 축중의 10%로 가정하였다. 도표 3은 매개변수 해석을 위한 객차와 화차의 제원을 나타낸 것이다.

도표 3. 해석대상 차량의 제원

분류	항목	제원
객차	기관차	디젤 7300호대 1량건인
	주행속도	100km/hr
	차륜반지름(mm)	430
	담면경사	1/40
화차	기관차	디젤 7300호대 1량건인
	주행속도	100km/hr
	차륜반지름(mm)	430
	담면경사	1/20

그림 3은 객차와 화차의 횡압주기 변화에 따른 각 응답비의 결과를 표시한 것으로 횡압의 주기가 짧아질수록 수평변위응답은 작아지지만 수평가속도변위비가 증가함을 알 수 있다.

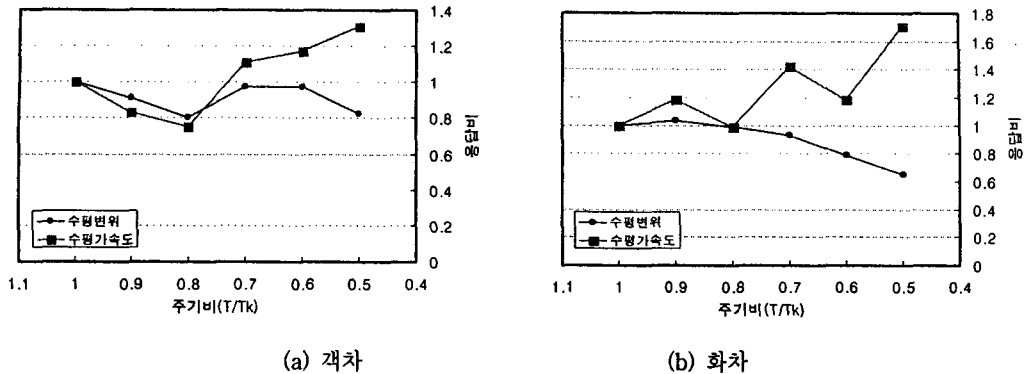


그림 3. 주기변화에 따른 응답비

4. 결 론

Klingel Movement의 이론적 모델과 횡압분포 측정실험에 근거하여 열차하중의 횡압에 대한 수치적 하중 모델을 수립하고 이를 이용한 해석 결과와 실험결과 비교로부터 적용의 타당성을 검토하였다. 또한 차륜의 답면경사 증가로 야기되는 횡압변동주기의 변화가 구조물의 응답에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중변동을 고려한 횡압 모델의 적용이 철도교량의 횡가동 시간이력해석의 정확도를 높이는 것으로 확인되었다.
- 2) 횡압의 변동주기가 작아짐에 따라 수평응답은 작아지는 경향을 나타내지만 가속도이력이 증가하는 경향을 나타내는 것으로 확인되어 향후 횡방향 해석의 정확성을 높이기 위해서는 답면경사에 근거한 횡압변동주기 산정이 중요한 것으로 판단된다.
- 3) 향후 궤도틀림등으로 인한 비주기 변동특성을 고려한 하중변동특성함수의 보완이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

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