

철도차량의 Kinematic Envelope에 관한 연구

A Study on the Kinematic Envelope of the Railway Vehicle

양희주* , 이강운* , 박길배*

Yang, Hee-Joo Lee, Kang-Wun Park, Kil-Bae

Abstract

Studied in this paper was the kinematic envelope of the railway vehicle to calculate the lateral displacement using the multi-body dynamic simulation program (VAMPIRE) and the BASS 501. The lateral displacement of railway vehicle is occurred by the clearance between wheel flange and rail, the track irregularity, the property of each suspension of vehicle and the cant of track etc. The results of analysis shown that Vehicle is not interfere with subway platform in any conditions namely the tare and full load condition, the wheel wear condition and the stationary and running of vehicle.

1. 서론

전동차는 대량 수송과 정시 운행과 같은 장점을 가지고 있지만, 기존의 지하철 승강장 중에는 차량과의 간격이 과대하여 어린이와 장애인 등 노약자들이 전동차 승하차에 어려움을 겪었다. 근래에 신설되는 지하철 승강장은 승객의 편의를 위하여 승강장과 차량과의 간격을 기존보다 줄여 건축하려 하고 있다. 이 경우 차량이 승강장과 간섭이 우려되므로 차량의 횡방향 변위를 계산하기 위한 Kinematic Envelope 연구가 필요하다.

본 논문은 차륜이 마모한도에 이른 공차/만차 중량의 전동차가 정차 시 혹은 주행 시의 횡 변위로 인해 차량이 지하철 승강장과 어느 정도의 유간을 유지 하는지 알아보기 위함이다.

차량은 대구시 전동차중 가장 중량이 무거운 M1차이며, 대차는 국내에서 상용화된 볼스타레스 대차로서, 대차 프레임과 윤축 사이의 1차 현가장치는 Conical rubber 스프링으로 구성되어 있으며, 대차 프레임과 차체 사이의 2차 현가장치는 공기 스프링으로 구성 되어 있다. 또한 차체와 대차를 연결하는 센터 피봇은 전후 방향으로 강성이 큰 스프링과 좌우 방향 댐퍼로 연결 되어 있으며, 센터 피봇 좌우에는 Stopper가 설치되어 있다. 차륜은 답면구배 1/20인 경사답면차륜을 적용 하였으며, 차륜 삭정 한도인 직경 780mm를 적용하였다. 철도 차량의 Kinematic Envelope를 구하기 위하여 철도차량 동특성 해석 전용 software인 VAMPIRE(Vehicle Dynamic Modeling

* 주식회사 로템, 중앙연구소 기초연구팀

Package In a Railway Environment)와 BASS 501을 이용하였다.

2. 모델링 및 제원

차량의 횡변위에 영향을 미치는 항목은 궤도 불규칙도, 현가 장치의 스프링/감쇠 특성, 궤도 틀림, 차륜 플랜지와 선로간의 유격, 선로의 캔트 등이 있으며, 위의 항목들이 복합적으로 작용하여 횡 변위에 영향을 미친다. 차량의 횡 변위를 계산하기 위해서는 크게 세가지 측면에서 고려되어야 한다.

첫번째는 차량 부문으로서, 차량이 주행하면서 발생하는 횡 방향 진동가속도 수준이 어느 정도 인지를 알아야 하며, 이를 구하기 위하여 VAMPIRE로 해석 하였다. 궤도 불규칙도는 BRR track 160을 적용하였다.

두 번째는 선로 부문으로서, 궤도 틀림(궤간,수평, 고저, 방향)에 기인한 차량 횡 변위이다. 궤도 틀림에 적용된 수치는 선로 정비기준 제2장 궤도 정비 기준 동적치 정비목표를 적용하였다.

세 번째는 차륜 삭정으로 인한 차륜 - 선로간의 유격이다. 차륜 삭정은 차륜 플랜지의 두께를 감소시키며, 이로 인해 차륜 - 선로간의 유격은 신조차륜 보다 큰 유간을 보인다.

2.1 차량 제원

Table 1은 해석 대상차량인 대구시 전동차(M1 car)에 대한 차량 제원을 나타낸다.

Table 1. Main parameters for vehicle modeling

구 분	항 목	공 차	만 차	Unit
차체	중량	19180	35180	kg
	무게중심 높이	1760	1910	mm
대차	중량/ea	6840	6840	kg
	무게중심 높이	500	487.6	mm
1차 현가장치	1차 스프링 전후 방향 상수/차륜	8.0	10.2	MN/m
	1차 스프링 좌우 방향 상수/차륜	5.04	7.06	MN/m
	1차 스프링 상하 방향 상수/차륜	1.62	1.55	MN/m
2차 현가장치	2차 스프링 전후 방향 상수/ea	0.083	0.124	MN/m
	2차 스프링 좌우 방향 상수/ea	0.069	0.103	MN/m
	2차 스프링 상하 방향 상수/ea	0.283	0.427	MN/m
댐퍼	좌우 댐퍼 감쇠계수	0.094	0.094	MN/m/s
주요 치수	대차 중심간 거리	12400	12400	mm
	축간 거리	2100	2100	mm
	1차 스프링 좌우간 거리	1970	1970	mm
	2차 스프링 좌우간 거리	1888	1888	mm
차륜	경사 댐퍼 1/20	780	780	mm

2.2 선로 제원

Table 2는 해석에 적용된 선로 제원을 나타낸다.

Table 2. Main parameters for track

항 목	Unit	비 고
궤간 틀림 : +10, -3	mm	선로 정비 규정 제 2장
수평 틀림 : +10, -10	mm	궤도 정비 기준 동적치
고저 틀림 : +10, -10	mm	
방향 틀림 : +10, -10	mm	정비 목표

2.3 선로 제원

차륜 삭정으로 인한 차륜 플랜지와 선로간의 유격은 아래식으로부터 구할 수 있다. Fig. 1은 유격 계산을 위한 개념도이다.

$$D = (G-L)/2 - T$$

$$= (1435 - 1354)/2 - 23 = 17.5 \text{ mm} \quad (1)$$

여기서,

D : 차륜 플랜지와 선로간의 유격

G : 궤간 (1435 mm)

L : 차륜 내면간 거리 (1354 mm), 최대 유격을 구하기 위해 안쪽 공차 적용

T : 차륜 삭정으로 인한 플랜지 두께 (23 mm), 허용범위 23 ~ 24 mm

2.4 궤도 불규칙도

궤도 불규칙도는 차량에 가해지는 1차적인 외란으로서, 차량 동특성은 이 궤도 불규칙에 대한 차량의 응답 특성이 된다. 일반적으로 궤도 불규칙도는 궤간 틀림, 수평 틀림, 궤도면(고저) 틀림, 궤도면(방향) 틀림의 매개변수를 사용하여 표시한다. 본 해석에서는 AEA Tech(구 BRR)에서 측정한 최고속도 160km/h에 상당하는 데이터를 적용하였으며 Fig. 2에 도시하였다.

3. 해석 조건

3.1 해석 조건

차량 횡 변위를 구하기 위한 Kinematic Envelope해석에 적용된 조건은 직선 구간에서 정차 시와 50 km/h, 80km/h로 주행 시로서 현가 장치가 정상적으로 작동한 상태이다. 해석 조건은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Condition of analysis

하중 조건	주행 속도			선로 조건
	0 km/h	50 km/h	80 km/h	
공 차	0 km/h	50 km/h	80 km/h	직 선
만 차	0 km/h	50 km/h	80 km/h	직 선

3.2 차량 조건

차량 횡 변위를 해석하기 위해서는 차량의 기준점을 먼저 정의하여야 한다. 기준점으로부터 차량이 좌우, 상하방향으로 어느 정도 움직이는가를 보기 위함이다. 본 해석의 기준점은 차량 공차시의 출입문 하부 최대 돌출 부위와 rain gutter를 기준으로 하였다. Table 4는 차량의 기준점이다.

Table 4. Reference point of vehicle

기 준 점	Point A (출입문 하부 최대돌출부위)	Point B (Rain gutter)
레일 중심으로부터 폭(Y)	1387.5 mm	1405.0 mm
레일 상면으로부터 높이(Z)	1153.0 mm	3370.0 mm

4. 차량 횡 변위 해석

Kinematic Envelope 해석은 선로 조건에 의한 차량의 거동 정도를 알아보기 위한 것으로서 적용된 수식은 아래와 같다.

$$2차\ roll\ 방정식 \quad K_{secroll} * v = M * g * [((h_g - h_s) * (\alpha + \beta + \gamma)) + G] + Q \quad (2)$$

$$1차\ roll\ 방정식 \quad K_{primroll} * \beta = M * g * [((h_g - h_p) * (\alpha + \beta + \gamma)) + \delta_s + G] \quad (3)$$

여기서

- $K_{secroll}$: 차량 당 2차 스프링 Roll 강성
- $K_{primroll}$: 차량 당 1차 스프링 Roll 강성
- M : 차체 중량
- g : 중력 가속도 (9.81 m/sec²)
- h_g : 레일 상면에서 차체 무게 중심까지 높이
- h_s : 레일 상면에서 2차 스프링까지 높이
- h_p : 레일 상면에서 1차 스프링까지 높이
- α : 선로 cant
- β : 선로에 대한 대차 Roll 각
- γ : 대차에 대한 차체 Roll 각
- δ_s : 2차 스프링 좌우 변위
- G : 차량 중앙에서 차체 무게 중심까지의 좌우 편차
- Q : 횡 변위로 인한 2차 스프링 모멘트

선로 조건에 따라 식(2)와 식(3)의 연립방정식을 풀어 차체 Roll각과 대차 Roll 각을 구한 후, 기준점에서의 차량 기하학적 움직임을 아래 식(4)에 의해 계산한다.

$$X = 0.5*W + T + K_{sway}*D + E \quad (4)$$

여기서

X : 차체 기준점의 변화된 위치

W : 차체 기준점의 폭

T : 선로 허용 공차

D : 실제 작용하는 cant

E : 선로에 따른 간섭량

K_{sway} : 대차 Roll 각(β), 차체 Roll 각(γ), 2차 스프링 좌우 변위(δs)와 선로 조건에 의한 상수로 식 (5)와 같다.

$$K_{sway} = \frac{\{(hc - hs) * \gamma\} + \{(hc - hp) * \beta\} + \delta s}{\Delta\alpha} \quad (5)$$

여기서

hc : 차체 측정 점의 높이

5. 해석 결과

대구시 2호선 전동차 M1 차량이 공차/만차 중량, 차륜 삭정 한도 시, 직선 선로에서 정차 시와 50km/h, 80km/h로 주행 시에 대한 차량 횡 변위 해석 결과를 Table 5와 Fig. 3 ~ 5에 나타내었다. 궤간 중심에서 지하철 승강장까지의 폭은 1450mm이고, 차량과 승강장과의 여유폭은 62.5mm이다. 해석 대상 차량의 기준점은 레일상면과 궤간 중심으로 부터의 거리를 적용하였다.

Table 5. Results of analysis for kinematic envelope of vehicle

	출입문 하부 최대 돌출부위		Rain gutter		비 고
	A_Y (mm)	A_Z (mm)	B_Y (mm)	B_Z (mm)	
기준점	1387.5	1153.0	1405.0	3370.0	
직선선로 정차 시					
공차시	1427.4	1140.1	1457.0	3357.0	Fig. 3
만차시	1428.8	1123.9	1461.7	3340.7	
직선선로 주행 시 - 50 km/h					
공차시	1440.2	1096.1	1487.1	3312.6	Fig. 4
만차시	1443.2	1072.5	1499.9	3288.7	
직선선로 주행 시 - 80 km/h					
공차시	1444.2	1086.9	1498.7	3303.3	Fig. 5
만차시	1448.6	1059.3	1516.5	3275.2	

6. 결 론

지하철 승강장과 차량의 간격을 결정하기 위해서는 지하철을 이용하는 승객의 편의를 최대한 고려함과 동시에 차량이 승강장과 간섭이 일어나지 않도록 해야한다.

본 논문은 국내에서 상용화된 볼스타레스 대차를 장착한 전동차 M1차량이 공차와 만차 시 그리고 차륜이 마모한도에 다다랐을때, 직선선로에서 정차 시와 50km/h, 80km/h로 주행 시 발생하는 차량 횡 변위를 계산하기 위한 Kinematic Envelope 해석 이다.

해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 정차 시

레일 상면 1153mm지점(출입문 하부 최대 돌출부위)에서의 차량 횡 변위량은 공차 시 39.9mm, 만차 시 41.3mm로서 승강장과는 22.6mm와 21.2mm유간을 보였다.

- 50km/h 주행 시

레일 상면 1153mm지점(출입문 하부 최대 돌출부위)에서의 차량 횡 변위량은 공차 시 52.7mm, 만차 시 55.7mm로서 승강장과는 9.8mm와 6.8mm유간을 보였다.

-80km/h 주행 시

레일 상면 1153mm지점(출입문 하부 최대 돌출부위)에서의 차량 횡 변위량은 공차 시 56.7mm, 만차 시 61.1mm로서 승강장과는 5.8mm와 1.4mm유간을 보였다.

정차 시와 주행 시에 대해 해석하였다. 차량 횡 변위량은 만차 상태에서 80km/h주행 시에 가장 크게 발생하였다. 레일 상면 1153mm지점에서의 차량 횡 변위량은 61.1mm로서 승강장과는 1.4mm의 유간을 확보함으로써 차량과 승강장과 간섭이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

참고문헌

1. B,M,Eickhoff and G,A,Scott, Structure gauging - maximizing the use of restricted clearance, IMechE, Vol.210 pp.63-71, 1996.
2. P.C.Annable, Kinematic envelop - theory and application, Railway engineer, Issue 3, pp.18-21, 1988.British Railway Research, VAMPIRE user s manual, Vol.1-2, 1994
3. British Railway Research, Bogie and suspension section design guide 501, pp.1-57, 1994

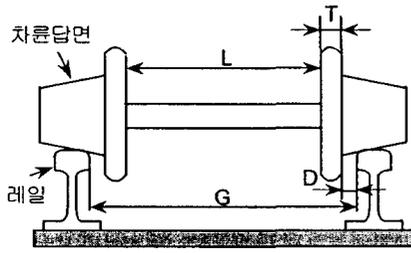


Fig. 1 Concept diagram for wheel-rail clearance

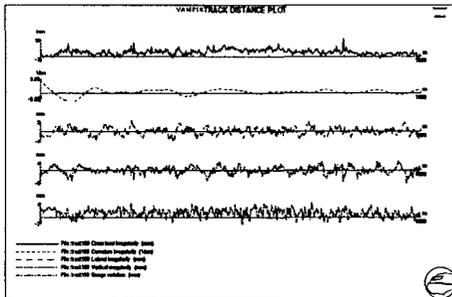


Fig. 2 Track irregularity

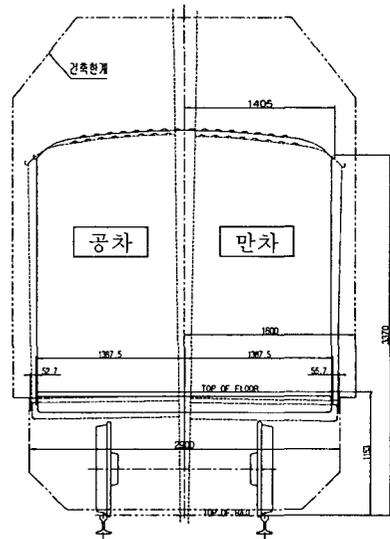


Fig. 4 Lateral displacement of vehicle in running condition - 50km/h

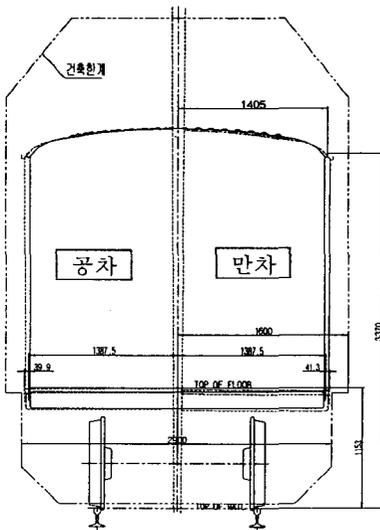


Fig. 3 Lateral displacement of vehicle in stationary condition

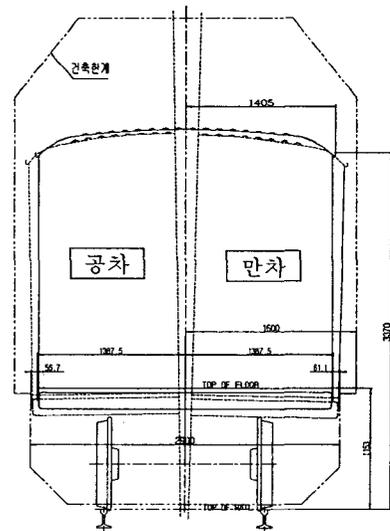


Fig. 5 Lateral displacement of vehicle in running condition - 80km/h