

철도차량의 Sway 특성에 관한 연구

A study on Sway calculation and test

성재호* 이강운* 양희주* 박길배[†]
Seong Jae-ho, Lee Kang-wun, Yang Hee-joo, Park Kil-bae

ABSTRACT

When a vehicle is running on the curve, the motion of the vehicle is subjected to a cant deficiency or cant excess. And the vehicle will move laterally, vertically and roll, this combination of movements is called sway. All modern vehicle suspensions with air-springs have non-linear characteristics, and the extent of the sway of a vehicle is dependent upon the suspension characteristics. The safe operation of a rail vehicle on the infrastructure is dependent upon maintaining adequate clearance between the vehicle and adjacent structures.

We have described the sway calculation procedure according to BASS501 in this paper, and compared the calculation result with the sway test result.

1. 서론

철도차량이 곡선 주행 시 캔트 양이 부족하거나 과다하면 좌우 방향, 상하 방향 및 Roll 방향의 운동이 발생한다. 현재 운용되는 공기스프링을 장착한 차량의 현가장치는 비선형 특성을 가지며, 이러한 특성은 차량의 거동에 지배적인 영향을 준다. 차량이 선로 위를 안전하게 주행하기 위해서는 선로주변 구조물과의 적절한 간격(Clearance)이 필요하며, 이를 위해 차량의 설계단계에서는 해석적인 방법을 통하여 차량의 거동을 검토하고, 차량이 만들어진 후에 실차 시험을 통하여 해석 결과를 검증하게 된다.

선로주변 구조물에 따른 차량의 한계를 검토하기 위해서는, 선로의 불규칙도, 횡의 마모, 차량의 운행 속도, 풍속의 영향으로 발생하는 동적거동과 곡선 선로 주행 시 캔트 변화량에 따른 정적 변위를 고려해야 한다. 본 연구에서는 곡선 선로를 주행하는 차량의 Curving Force(Cant Deficiency and Excess)만을 고려하여 해석적으로 Sway를 계산하는 절차를 소개하였다. Sway를 계산하는 절차에서는 1차, 2차 현가장치, 차량 임의의 점에서의 Roll의 양, 좌우방향 변위, 상하방향 변위, K-Sway, K-Drop을 해석적으로 구하는 방법을 다루었다. 또한 Sway 실차시험 절차와 시험데이터 분석 시 고려해야 할 사항을 소개하였고, 광과기를 사용하여 캔트 변화량에 따른 실제차량의 횡 방향, 상하 방향 및 Roll 방향의 변위를 구하였으며, 해석적인 방법으로 구한 결과와 비교 검토하였다.

* 주식회사 로템, 기술연구소

[†] 주식회사 로템, 기술연구소

2. 이론적 배경

철도차량의 Sway는 트랙의 레이아웃과 트랙의 불규칙도, 차량의 속도와 cant량, 바람의 영향, 현가장치의 성능과 특성에 의한 횡 방향 변위와 Roll의 변위를 말한다. Sway 시험은 절차가 복잡할 뿐만 아니라 많은 비용과 시간의 투자가 필요하다. 이러한 수고와 비용을 절약하기 위해 설계단계에서 해석적인 방법으로 차량의 거동과 변위를 예측함으로써, 선로주변의 구조물과의 안정성을 확보하고 실차시험의 검증자료로 활용한다.

2.1 Sway and roll 계산 절차

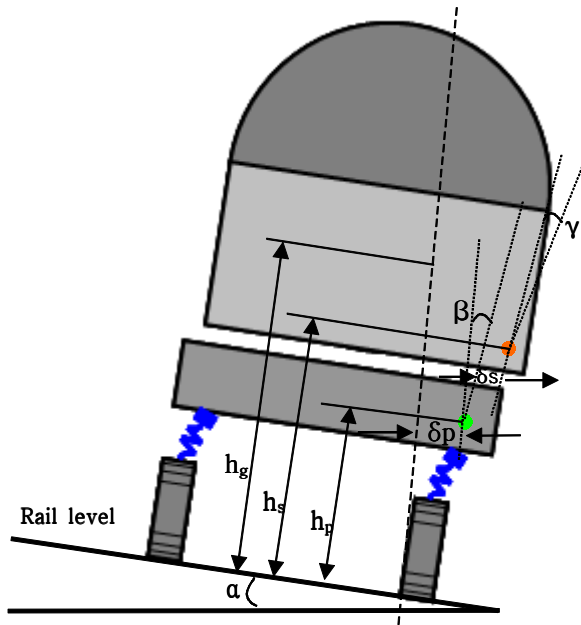


그림 1. 캔트를 주었을 때 차량의 모델

- α : 캔트에 의한 Track roll angle
- β : 트랙에 대한 대차의 Roll
- γ : 대차에 대한 차체의 Roll
- M : 차체의 무게
- g : 중력 가속도
- δ_p : 1차 현가장치 좌우방향 변형 양.
- δ_s : 2차 현가장치 좌우방향 변형 양.
- h_p : Rail level에서 1차 현가장치까지의 높이
- h_s : Rail level에서 2차 현가장치까지의 높이
- h_g : Rail level에서 무게중심까지의 높이
- $K_{prim.lat}$: 1차 현가장치의 좌우방향 강성
- $K_{sec.lat}$: 2차 현가장치의 좌우방향 강성
- $K_{prim.roll}$: 1차 현가장치의 Roll 강성
- $K_{sec.roll}$: 2차 현가장치의 Roll 강성
- G : 차체 무게중심의 좌우방향 편심량.
- Q : 2차 현가장치로 인한 모멘트

그림1과 같이 캔트가 주어진 궤도위에 차량이 서 있는 경우 각 현가장치에 작용하는 힘의 평형관계를 분석하면 다음과 같다.

Secondary Lateral Equation

$$\delta_s = \frac{M \times g \times \alpha}{K_{sec.lat.}} \quad (1)$$

Secondary Roll Equation

$$K_{sec.Roll} \times \gamma = M \times g \times \{(h_g - h_s) \times (\alpha + \beta + \gamma) + G\} + Q \quad (2)$$

Primary Roll Equation

$$K_{Prim.Roll} \times \beta = M \times g \times \{(h_g - h_p) \times (\alpha + \beta + \gamma) + \delta_s + G\} \quad (3)$$

Primary Lateral Equation

$$\delta_p = \frac{M \times g \times (\alpha + \beta + \gamma)}{K_{Prim.Lat.}} \quad (4)$$

차체의 임의의 점의 좌우방향 변위는 식(5)와 같이 구할 수 있으며, H는 Rail level에서 임의의 점까지의 높이이다.

$$Lateral\ displacement = \{(H - h_s) \times \gamma\} + \{(H - h_p) \times \beta\} + \delta_s + \delta_p \quad (5)$$

2.2 Roll Drop

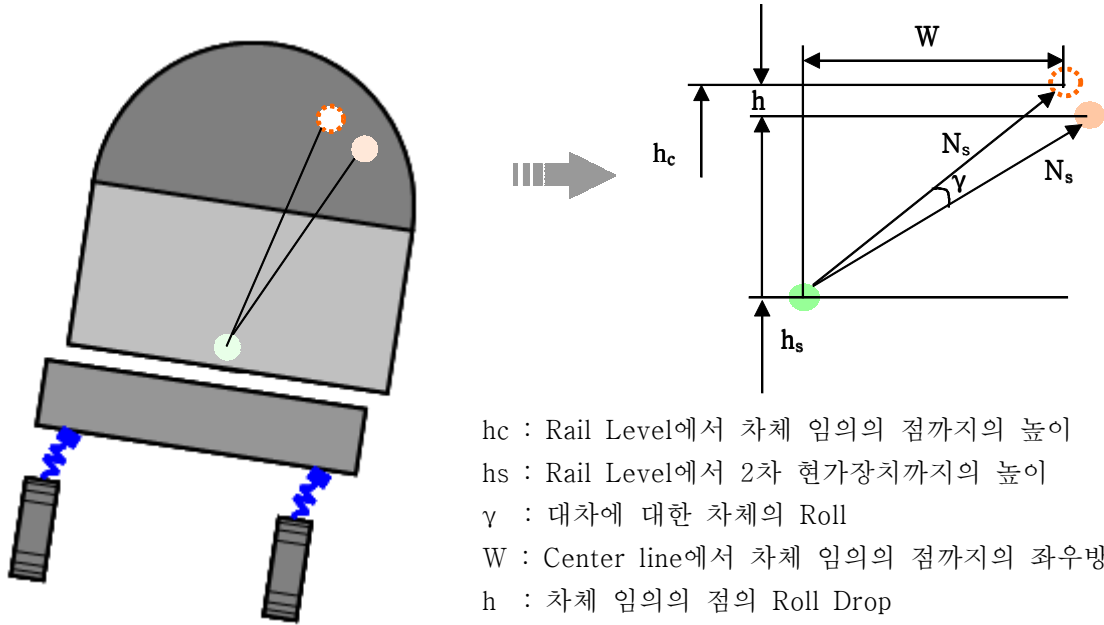


그림 2. 차체 임의의 점에서의 Drop

차체의 Roll변위에 의하여 횡 방향 변위뿐만 아니라 상하방향 변위가 발생하는데, 그 변위의 양은 다음과 같다.

Secondary Roll에 의한 Drop양

$$= (h_c - h_s) - \{N_s \times \cos[\sin^{-1} \frac{W}{N_s} + \gamma]\} \quad \text{if } h_c > h_s \quad (6-1)$$

$$= (h_c - h_s) + \{N_s \times \cos[\sin^{-1} \frac{W}{N_s} - \gamma]\} \quad \text{if } h_c < h_s \quad (6-2)$$

$$\text{where } N_s = \sqrt{W^2 + (h_c - h_s)^2}$$

Primary Roll에 의한 Drop양

$$= (h_c - h_p) - \text{sec.roll drop} - \{N_p \times \cos[\sin^{-1} \frac{I}{N_p} + \beta]\} \quad \text{if } h_c > h_p \quad (7-1)$$

$$= (h_c - h_p) - \text{sec.roll drop} + \{N_p \times \cos[\sin^{-1} \frac{I}{N_p} - \beta]\} \quad \text{if } h_c < h_p \quad (7-2)$$

$$\text{where } I = W + \delta s + (h_c - h_s) \times \gamma$$

$$N_p = \sqrt{I^2 + (h_c - h_p - \text{drop due to sec.roll.})^2}$$

따라서 차체의 임의의 점의 Roll에 의한 상하방향 변위는 다음과 같다.

$$\text{Roll drop} = \text{Drop due to secondary roll} + \text{Drop due to primary roll.}$$

Track Roll angle에 대한 좌우방향 변위(Sway)와 상하방향 변위(Roll Drop)로부터 K-Sway와 K-Drop양을 얻을 수 있다. K-Sway와 K-Drop은 Cant에 대한 좌우방향 변위 및 상하방향 변위의 기울기이며, 이는 현가장치의 특성을 나타낸다.

3. 시험 배경

설계단계에서 해석적으로 예측한 차량의 Sway 양과 실제시험 결과를 비교, 검토하기 위하여 실차시험을 실시하였다.

3.1 시험 절차

실차시험은 공차와 만차 시 공기스프링에 공기의 압력이 충분한 경우(Inflated Condition)와 공기가 없는 경우(Deflated Condition)로 나누어 실시하였다. 실차 시험 절차는 다음과 같다.



그림3. 실차 시험 모습

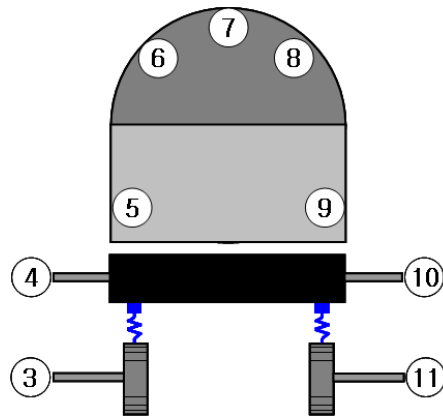


그림4. Target의 개략적인 위치도

1. 그림3,4에서와 같이 Sway양을 측정하고자 하는 Axlebox, 대차, 차체에 9개의 Target을 부착하였고, Reference Target을 Rail top과 트랙센터에 설치하였다.
2. 차량 양쪽에 Cant 양을 0→25→50→100→150→180→150→100→50→25→0mm 순으로 차례대로 조절하였으며, 현가장치의 비선형 특성인 Hysteresis loop의 완성을 위해 양쪽모두 들었다 내린 후 추가적으로 25mm를 들었다 내렸다. 차량 한편에서는 유압 실린더와 Packer를 이용하여 Cant 양을 조절하였으며, 다른 한편에서는 안전을 고려하여 탈선 방지용 Jig를 설치하였다.
3. 마지막으로 차량의 변위가 발생하였을 때, 광파기를 사용하여 Target의 좌표 값을 측정하였다.

3.2 시험 데이터 분석 절차

시험 데이터 분석 절차는 다음과 같다.

- 1) 실제 휠에 가해진 Cant 양.
- 2) 차체, 대차 및 Axlebox의 상대적인 Roll
- 3) 1,2차 현가장치의 좌우 방향 및 상하 방향 변위

시험결과 산출 시 고려해야 할 사항이 2가지 있었다. 한 가지는 Wheel과 Rail 사이의 Clearance (8mm 가량)와 Wheel과 탈선방지용 Jig간의 Contact이다. 이 2가지 요소로 인해 Wheel과 Rail간의 두 접촉점의 간격이 일정하게 유지되지 못하였다. 다른 한 가지는 광파기와 차체면의 Coordinates System의 불일치이다. Sway는 차체면의 좌우방향과 상하방향의 평면을 고려하여 계산한 값이기 때문에 광파기의 길이 방향 벡터가 차체 면과 수직하지 않다면 측정좌표의 보정이 필요하게 된다.

시험 결과를 얻기 위해 광파기의 길이방향 벡터와 차체 면을 수직하도록 좌표변환 하였고, 휠과 레일의 접촉점의 변화를 고려하여 Axlebox에 부착한 Target3, Target11의 좌표를 Reference로 하였다.

4.1 시험과 해석 결과

표1) 해석적으로 계산하여 예측한 Roll, Sway 및 Drop

		cant (mm)	Max. Roll(deg)		Max. 횡방향 변위(mm)		Max. Roll Drop(mm)	
			prim.	sec.	solebar	cantrail	solebar	cantrail
공 차	inflated	-180	-0.41	-0.71	-33.3	-74.3	23.0	20.3
		180	0.41	0.70	33.2	74.2	23.0	20.3
	deflated	-180	-0.39	-0.28	-29.8	-54.2	14.4	12.7
		180	0.39	0.28	29.8	54.3	14.4	12.7
만 차	inflated	-180	-0.55	-1.30	-47.0	-114.9	36.7	32.6
		180	0.55	1.30	47.2	115.3	36.7	32.6
	deflated	-180	-0.48	-0.24	-36.7	-62.9	13.1	11.2
		180	0.48	0.24	36.7	63.0	13.1	11.3

표2) 실험을 통한 Roll, Sway 및 Drop

		cant (mm)	Max. Roll(deg)		Max. 횡방향 변위(mm)		Max. Roll Drop(mm)	
			prim.	sec.	solebar	cantrail	solebar	cantrail
공 차	inflated	-180	-0.47	-0.75	-33.0	-74.2	23.2	20.1
		180	0.48	0.72	35.3	77.4	24.8	21.7
	deflated	-180	-0.52	-0.19	-29.8	-53.1	13.6	13.3
		180	0.54	0.21	27.8	54.9	14.4	12.7
만 차	inflated	-180	-0.76	-1.21	-45.4	-109.8	37.4	32.7
		180	0.66	1.21	44.2	108.9	36.6	33.8
	deflated	-180	-0.64	-0.19	-28.7	-53.3	10.9	8.3
		180	0.58	0.16	36.6	60.1	11.2	9.3

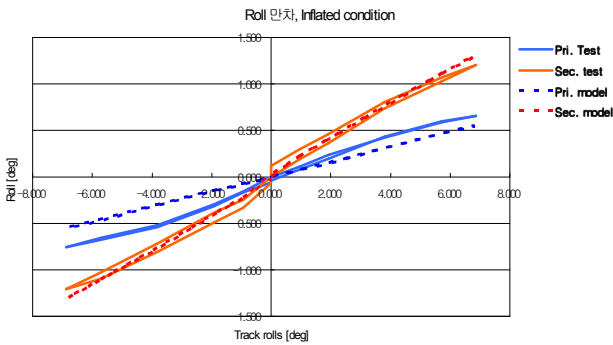


그림5) 만차, inflated, Roll

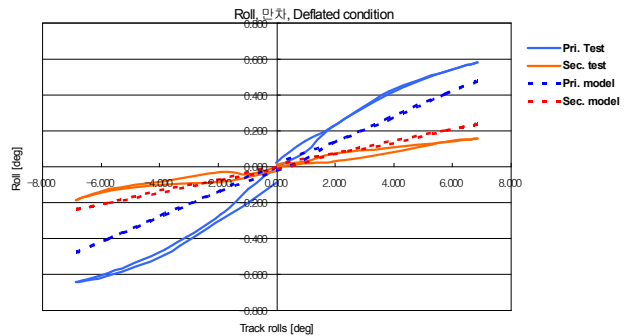


그림6) 만차, deflated, Roll

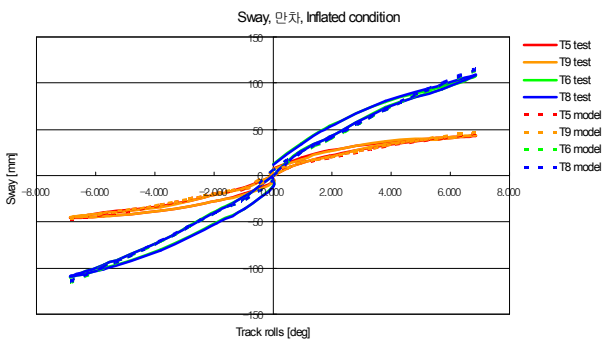


그림7) 만차, inflated, 좌우방향 변위

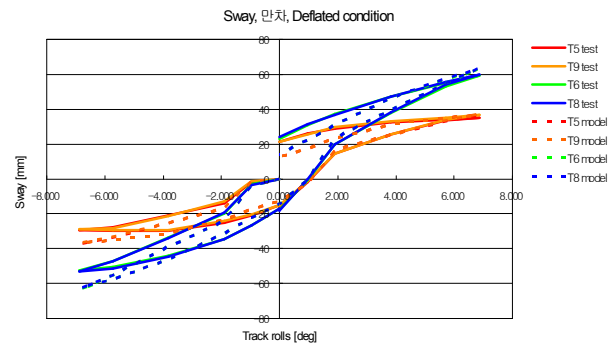


그림8) 만차, deflated, 좌우방향 변위

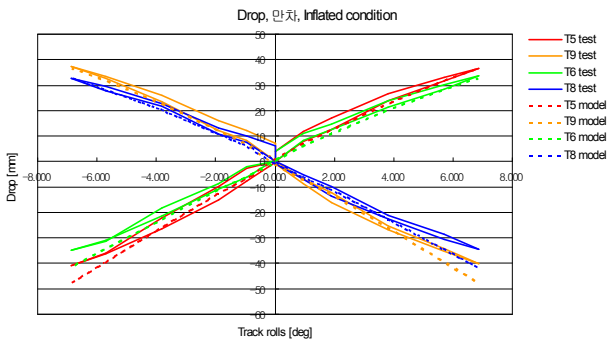


그림9) 만차, inflated, Roll drop

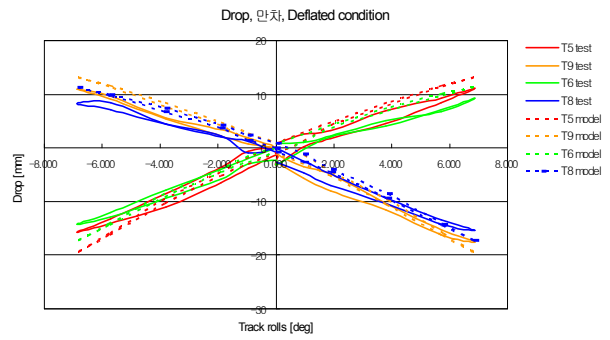


그림10) 만차, deflated, Roll drop

5. 결과 분석

본 연구에서 가장 관심을 가졌던 부분은 Solebar(Target 5, Target 9)와 Cantrail(Target 6, Target 8)의 좌우방향 변위와 상하방향 변위이다. 표1~2에서 살펴보는 바와 같이 설계단계에서 해석적으로 계산하여 예측한 값과 실차시험 결과가 잘 맞는 것으로 확인되었다.

실제로 유압 실린더를 사용하여 입력된 Cant의 양은 Axlebox에 부착된 2개의 Target을 가지고 직접 측정할 수 있다. 입력된 Cant의 양(<Target3,11)은 이론적인 Cant의 양과 같아야 하지만, 시험 중에 두 접촉점의 간격이 일정하게 유지되지 못하여 오차가 발생하였으며, 그 값의 차이는 표3과 같다.

표3. 실제로 입력된 캔트량

		Cant(mm)	이론적인 Track roll(Deg)	측정된 Roll(Deg)	오차 (Deg)
공 차	inflated	-180	-6.85	-7.12	-0.27
		180	6.85	7.04	0.19
	deflated	-180	-6.85	-7.02	-0.17
		180	6.85	7.02	0.17
만 차	inflated	-180	-6.85	-6.86	-0.01
		180	6.85	6.99	0.14
	deflated	-180	-6.85	-6.94	-0.09
		180	6.85	6.85	0.00

Roll(그림5,6), K-Sway(그림7,8), K-Drop(그림9,10)의 시험결과를 살펴보면, Track Roll Angle이 증가함에 따라 Graph의 기울기가 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 1차, 2차 현가장치와 Bump Stop 등의 비선형 특성이 반영되었기 때문이다. 시험결과와 해석결과의 차이를 보이는 것은 해석 수행 시 위에서 언급한 요소들의 비선형 특성을 모두 반영하지 못한 것과, 휠과 레일의 두 접촉점의 간격이 일정하게 유지되지 못하였기 때문이다. 이렇게 얻은 K-Sway, K-Drop의 시험결과는 동역학적 효과를 고려한 차량의 거동과 함께 실제차량의 최종 변위를 계산하는 데 활용된다.

6. 감사의 글

직접 시험에 동참하여 힘을 기울여 주셨던 모든 분들과, 물심양면으로 도움을 주셨던 팀원들에게 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

7. 참고문헌

1. Bogie and suspension section design guide 501, pp. 3-18
2. K.B.Park(2005), Train Sway Test Procedure, Rotem's Doc No C68-D-0452
3. GM/RT2149(2003), Issue 3, pp.1-19.