전기동차가 공기없는 상태로 운행시 열차 탈선에 미치는 영향 연구

A Study on the Effect of Electric Vehicles on Train Derailment when Running without Air

박금배*, 이동백*†

Geum-bae, Park*, Dong-baek Lee*†

초 록 전기동차 2차 현수장치(공기스프링)에 공급되는 압축공기는 차체하중을 지지하고, 차체 상면 높이를 일정하게 유지시켜주며, 운행 중 진동과 소음을 줄여 승차감을 좋게 한다. 또한 승객하중에 비례하는 응하중 압력을 이용하여 각 차량에 요구되는 제동력을 일정하게 유지하는 기능을 수행하고 있다. 2020년 5월 24일 서울 5호선에서 압축공기 공급이 없는 고장차량(8량)을 정상차량(8량)에 연결하여 운행 중 우곡선에서 고장차량 네 번째 차량 앞 대차가 탈선한 사례가 있었다. 본 연구에서는 공기공급 없는 상태로 전기동차가 운행 시 탈선평가 요소 중 하나인 윤중감소율 변화를 분석하였다.

주요어 : 윤중감소율, 공기 무관통, 열차탈선

1. 서 론

윤중은 차륜이 수직으로 궤도에 작용하는 힘으로서 차량의 자중에 따라 결정되며, 차량의 진동이나 중심의 편기, 궤도 및 차량의 평면성 틀림, 곡선에서의 캔트 및 원심력, 풍압 등에 의해 윤중의 감소가 발생한다.

이때 윤중 감소량(△P)에 대한 정적윤중비를 윤중감소율이라 하며 간접적인 탈선평가 지표의 하나이다. 이 값이 허용한도를 초과하면 탈선의 위험이 크다는 것이다. 윤중감소율은 다음식으로 정의된다.

$$\frac{\triangle P_t}{P_0} = \frac{(P_0 - Pd)}{P_0} \times 100$$

- P_0 : 평균윤중(좌우차륜의 정지 윤중의 합/2)
- P_d : 윤중의 측정치
- Pt : 윤중변화량

윤중감소율의 목표치는 이론해석, 실험선에서 시행된 탈선실험 등에서 정해졌으며, 0.6(60%)을 정적 윤중감소율의 목표치로 하고 있다. 본 연구에서는 공기공급 없는 상태로 전기동차가 운행시 윤중감소율을 계산하여 탈선에 미치는 영향을 분석하였다.

† 교신저자: 국토교통부 항공철도사고조사위원회(back3790@korea.kr), * 국토교통부 항공철도사고조사위원회(barkscup@korea.kr)

2. 본 론

탈선사고 평가는 직접평가(탈선해석 또는 탈선계수)와 간접평가(윤중감소율, 회전저항, 진동시험 등 계산 및 주행시험)가 있으며 세부 평가방법은 Table 1과 같다.

철도차량 기술기준에서 정하고 있는 평가기준은 탈선계수는 1.2이하, 윤중감소율은 60% 이하, 정지윤중비는 4%이하이다.

Table 1 Derailment Accident Evaluation Method

구 분	직접평가	간접평가	
		(1)	(2)
평가요소	횡력/ 수직력	윤중감소율 회전저항 진동시험 (실차 주행시험)	정지윤중비 선로뒤틀림 스프링강성 차체/대차 마찰
평가방법	탈선해석 (탈선계수)	계산 및 시험	계산 및 측정

본 연구에서는 서울 5호선 전동차가 공기 공급없는 상태로 곡선부 R401구간에 운행되는 것을 가정하고 설계차량 및 사고차량의 데이터를 입력하고 UIC/ORE B55 Report No.8[1] 을 적용하여 윤중감소율을 계산하였다.

2.1 차량 및 궤도 입력 자료

윤중감소율 계산을 위한 사고차량 및 궤도 입력 자료는 다음과 같다

2.1.1 2차 스프링 강성

2차 스프링 강성은 공기가 없는 상태임으로 보조스프링의 강성 설계치를 적용하였다.

- 하중: 10,300kgf-500kgf= 9,800kgf
- 변위: 8 mm
- 상수: 9,800/8=1,225kgf/mm= 12.02 kN/mm

2.1.2 선로기울기

사고지점의 좌·우 선로 차에 의한 선로비틀림, 즉 선로기울기는 다음과 같다.

- 곡선반경: 401m
- 최대캔트: 149mm, 최소캔트: 30 mm
- 완화곡선 길이: 53.4m
- 선로기울기: (149-30)/(53.4x1,000)= 2.2‰

2.2 윤중감소율 계산

2.2.1 단차상태에서 안전기준

단차상태에서 UIC/ORE B55 Report No.8에서 제시하는 차체 및 대차 비틀림과 판단기준이다.

- 비틀림선로: 차체비틀림(g*)=15/2a*+2(‰)
  대차비틀림(g+)=7-5/2a+(‰)
- 판단기준: dQ/Q ≦ 60%

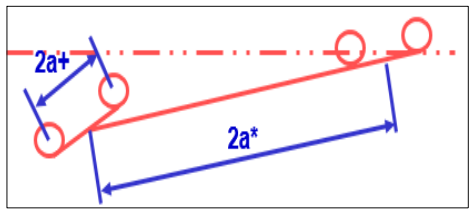

Fig. 1 Distance between bogie centers(example)

1) 국제철도연맹 연합연구소 보고서에서 제안한 윤중감소율 산출 방식

2.2.2 사고차량 윤중감소율

사고구간 선로 및 사고차량 1차 스프링(설계 신품 및 사용품) 특성을 반영한 윤중감소율을 계산한 결과는 **Table 2**와 같다.

Table 2. Accident vehicle wheel weight reduction rate

항 목		내 용
공차 중량		T : 28.7ton, M : 34.5ton
대차 중량		T : 5.5ton, M : 7.3ton
대차 축간거리		2.1m
대차 중심간 거리		13.8m
차륜/레일 접촉거리		1.5m
1 차 현수장치간 거리		1.97m
2 차 현수장치간 거리		2.25m
1 차 현수장치 강성	신품	T : 1.60kN/mm, M : 2.00kN/mm
	사용품	T : 2.04kN/mm, M : 2.45kN/mm
2 차 현수장치 강성	신품	T·M : 12.02kN/mm
	사용품	T·M : 12.02kN/mm
무게 중심		T : 1.450m, M : 1.330m
평균 윤중(P0)		T : 35.193kN, M : 42.306kN
차체 비틀림 량		T : 2.22‰, M : 2.22‰
대차 비틀림 량		T : 2.22‰, M : 2.22‰
차체 비틀림 강성	신품	T : 7.91kN/mm, M : 9.48kN/mm
	사용품	T : 9.63kN/mm, M : 11.11kN/mm
대차 비틀림 강성	신품	T : 1.45kN/mm, M : 1.81kN/mm
	사용품	T : 1.85kN/mm, M : 2.22kN/mm
차체 비틀림에 의한 윤중변화	신품	T : 17.55kN, M : 21.05kN
	사용품	T : 21.39kN, M : 24.66kN
대차 비틀림에 의한 윤중변화	신품	T : 3.22kN, M : 4.02kN
	사용품	T : 4.10kN, M : 4.93kN
캔트에 의한 윤중변화	신품	T : 0.69kN, M : 0.77kN
	사용품	T : 0.69kN, M : 0.86kN
총 윤중 변화량(Pt)	신품	T : 21.47kN, M : 25.84kN
	사용품	T : 26.18kN, M : 30.45kN

2.2.3 정상차량 윤중감소율

사고구간 선로 및 정상차량 1차 스프링(설계 신품 및 사용품) 특성을 반영한 윤중감소율을 계산한 결과는 **Table 3과** 같다.

Table 3. Normal vehicle wheel weight reduction rate

항 목	내 용
공차 중량	T : 28.7ton, M : 34.5ton
대차 중량	T : 5.5ton, M : 7.3ton
대차 축간거리	2.1m
대차 중심간 거리	13.8m

차륜/레일 접촉거리		1.5m
1 차 현수장치간 거리		1.97m
2 차 현수장치간 거리		2.25m
1 차 현수장치 강성	신품	T : 1.60kN/mm, M : 2.00kN/mm
	사용품	T : 2.04kN/mm, M : 2.45kN/mm
2 차 현수장치 강성	신품	T : 0.26kN/mm, M : 0.33kN/mm
	사용품	T : 0.26kN/mm, M : 0.33kN/mm
무게 중심		T : 1.450m, M : 1.330m
평균 윤중(P0)		T : 35.193kN, M : 42.306kN
차체 비틀림 량		T : 2.22‰, M : 2.22‰
대차 비틀림 량		T : 2.22‰, M : 2.22‰
차체 비틀림 강성	신품	T : 0.931kN/mm, M : 1.17kN/mm
	사용품	T : 0.95kN/mm, M : 1.19kN/mm
대차 비틀림 강성	신품	T : 1.45kN/mm, M : 1.81kN/mm
	사용품	T : 1.85kN/mm, M : 2.22kN/mm
차체 비틀림에 의한 윤중변화	신품	T : 2.06kN, M : 2.59kN
	사용품	T : 2.10kN, M : 2.64kN
대차 비틀림에 의한 윤중변화	신품	T : 3.22kN, M : 4.02kN
	사용품	T : 4.10kN, M : 4.93kN
캔트에 의한 윤중변화	신품	T : 0.69kN, M : 0.77kN
	사용품	T : 0.69kN, M : 0.86kN
총 윤중 변화량(Pt)	신품	T : 5.97kN, M : 7.38kN
	사용품	T : 6.90kN, M : 8.43kN

3. 연구결과

3.1 사고차량와 정상차량 윤중감소율 비교

탈선위치에서 분석한 사고차량과 정상차량의 윤중감소율 비교값은 Table 4와 같다. 정상차량은 신품 및 사용품 모두에서 윤중감소율 기준(60%)을 초과하지 않았으나, 사고차량의 경우 모두 윤중감소율 기준을 초과한 결과를 보여주고 있다.

공기스프링에 압축공기가 없는 고장차량의 윤중감소율은 정상차량 대비 약 43%~54% 높고 기준을 초과함으로써 탈선에 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다.

Table 4. Accident vehicle and Normal vehicle comparison

윤중감소율		윤중감소율(△Pt/P0)		비 고
		정상차량	사고차량	
T	신품	16.96%	60.99%	44.03%(↑)
	사용품	19.60%	74.39%	54.79%(↑)
M	신품	17.44%	61.07%	43.63%(↑)
	사용품	19.92%	71.97%	52.05%(↑)

3.2 기타 탈선요인

최초 탈선 차량(T car, 28ton)은 중앙부(8량 중 4번째)에 연결되어 있고 동력차량(M car, 39ton) 보다 11ton이 가볍다.

하구배에서 탈선 차량은 뒤 4량이 미는 차량중량(136ton)에 의한 종방향 압축하중과 캔트 감소 구간에서 외측 차륜에 발생한 과도한 횡력이 탈선에 영향을 미친다.

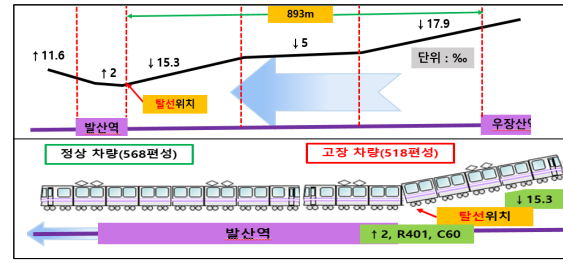

Fig. 2 Derailment Analysis Situation Diagram

4. 결론

공기스프링에 압축공기 유·무에 따른 윤중감소율 변화를 분석한 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 공기 스프링에 압축공기가 배기된 비정상 상태에서 윤중감소율은 1차 스프링이 신품 및 사용품 모두 기준치를 초과하였다.

(2) 공기 스프링에 압축공기가 충기된 정상 상태에서의 윤중감소율은 1차 스프링이 신품 및 사용품 모두에서 기준치를 초과하지 않았다.

(3) 윤중감소율 변화는 1차 스프링 특성치 변화보다 2차 스프링 압축공기 배기에 따른 기능상실이 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

따라서 철도 운영기관에서는 고장차량 이동시 주공기관 관통에 따른 공기스프링 기능 확보 및 공기 제동력 확보가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 도시철도차량(전동차) 기술기준, 2018

[2] UIC/ORE B55 Report No.8

[3] 서울 5호선 발산역 구내 전동열차 탈선사고 조사자료, 항공철도사고조사위원회, 2021