철도 차량에서의 차륜 답면 등가구배 특성
Equivalent Conicity Characteristics of Wheel Tread on the Rolling Stock

이찬우* 김재철** 1)
Lee, Chan-Woo Kim, Jae-Chul

ABSTRACT

The running safety of the rolling stock depends on the design characteristics and the contact condition between wheel and railway. In this study, it is analyzed how equivalent conicity of wheel tread or its characteristics has influence on the running safety.

1. 서 론

철도 차량에서의 차륜 형상은 차량의 주행안정성 측면에서 매우 중요하다. 차륜 답면의 형상은 차량의 최고속도, 선로조건, 차륜마모 측면 등을 주로 고려하여 차량 특성별, 운행노선별 특성에 맞게 제작되는 특징이 있다. 본 연구에서는 차륜답면 형상의 요구조건, 차륜 답면 등가구배의 특성 및 차륜답면 등가구배의 기준 등을 유럽 고속철도 시스템을 기존선과의 연계 운행을 적용할 시의 예를 기준으로 소개하고자 한다.

2. 차륜 답면형상에 요구되는 조건

철도차량에 적용되는 차륜의 답면의 형상의 1차적인 요구 조건은 차량이 레일을 따라 주행할 시 차량을 안전하게 안내하는 역할을 충실히 할 수 있어야 한다. 또한 차륜답면 형상에 요구되는 주요 요건은 다음과 같다.

- 탈선에 대한 안전성이 높을 것
- 주행안정성이 좋을 것 : 고속 주행시 차체와 대차가 좌우로 흔들리는 현상인 사행동이 발생하지 않아야 함
- 곡선 통과 성능이 좋을 것 : 곡선 주행시 차륜과 레일 사이에 발생하는 횡방향의 힘이 적은 것을 의미 함
- 분기기 통과시 문제를 발생하지 않을 것
- 주행시 마모가 작고 마모에 의한 형상 변화가 적을 것
- 차륜과 레일의 미끄럼 마찰이 작아서 차륜과 레일의 마모가 작을 것.

* 한국철도기술연구원, 책임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 정회원

· 차륜 마모시 삭정이 가장 경제적으로 할 수 있는 마모 형상일 것
· 차량 진동이 적을 것

상기의 조건을 차량을 운용하는 운영자 입장에서 판단하여 각각 특유의 차륜 답면 형상이 제안되고 또 사용되는 것이다.

3. 차륜 답면에서의 등가 구배 개념 및 종류

차륜과 레일의 접촉은 철도 차량의 동역학적 거동을 설명하는데 가장 기본적인 것이다. 이 가운데 차륜-레일 접촉에 관한 파라미터들 중에서 「등가 구배」는 가장 핵심적인 역할을 한다. 그 이유는 직선 구간과 큰 반경을 지닌 곡선 구간에서 차륜-레일의 접촉을 잘 설명할 수 있기 때문이다. 특히 관성력이 없고, 등속도 V=dx/dt로 궤도 위에서 주행하는 윤축 운동은 다음 미분 방정식 식(1)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d^2y}{dx^2}+\left(\frac{2\tan\gamma}{er_0}\right)y=0 \qquad (1)$$

여기서 y : 궤도위에서 윤축의 횡방향 변위
e : 궤도 치수
r_0 : 윤축의 중심이 궤도위에 있을 때 차륜의 반경
γ : 차륜의 등가경사도

γ가 상수일 때, 이 미분 방정식 식(1)의 해는 파장 λ인 사인파가 된다. 차륜의 등가경사도를 클링겔의 공식으로 표현하면 아래 식(2)와 같이 된다.

$$\gamma=\sqrt[2\pi]{\frac{r_0 e}{2\tan\gamma}} \quad \text{클링겔의 공식} \qquad (2)$$

또한 차륜이 원뿔형상을 갖지 않을 때는, 등가 경사도를 별도로 정의하여 사용한다. 이 경우 윤축의 축방향 변위와 동일한 파동을 갖는 원추형 차륜으로 대체하여, 이 원추형 차륜을 갖는 윤축의 원추각(테이퍼각)의 탄젠트 값(tan γe)을 등가 경사도로 정의한다.

이 차륜 답면의 등가구배는 특정 값으로 주어지지 않고 높은(high), 중간(medium), 낮은(low) 등으로 표현한다. 이 때 등가구배 별 범위를 나타낼 때 일반적으로 다음과 같이 나타낸다.

낮은 등가구배(low conicity) $r < 0.15$
중간 등가구배(medium conicity) $0.15 < r < 0.3$
높은 등가구배(high conicity) $0.3 < r$

국내 차량의 경우 무궁화 객차의 경우 차륜답면 구배가 1/20h 으로 초기 등가구배는 r ≒ 0.05이고, 새마을호인 경우에는 차륜답면 구배가 1/40으로 초기 등가구배는 r ≒ 0.025 정도이다. 또한 경부 고속철도 차량인 KTX 차량의 차륜답면 등가 구배는 GV 40(차륜답면구배 1/40)인 경우에는 0.025이고, XP 55 차륜(차륜답면 구배 1/20)의 경우에는 0.053 정도로 초기에는 낮은 등가구배 영

역에 속하고 있으나 주행시 차륜 마모에 의거하여 중간 등가 구배 영역으로 변화됨을 실험적으로 알 수 있다.

4. 차륜 답면에서의 등가 구배 특성 및 관리 사례

차륜 답면 등가구배 특성은 차량의 주행안정성 판별에 많이 적용되는 임계속도에 큰 영향을 주고 있다. 임계속도는 차륜 답면 등가구배 때문에 차량이 주행 중에 윤축(wheel and axle)의 미소한 횡방향 변위가 궤도 중심쪽으로 향하는 힘을 발생시켜 윤축의 운동방향을 궤도 중심으로 쏠리게 한다. 이후 윤축의 운동방향이 궤도의 중심선을 지나게 되면 반대쪽에서도 같은 현상이 일어나서 차량의 횡방향 흔들림 현상이 발생하게 된다. 실제로 차륜 답면구배가 너무 낮은 경우에는 차륜이 궤도방향으로의 유도작용이 불충분하게 되고, 차륜답면 구배가 너무 크면 대차의 불안정성이 커져서 차량의 사행동이 발생되게 된다. 이때 차륜과 레일 사이의 상호 복원력이 불충분하게 되면 차량 탈선이 일어나게 될 때 차량의 "임계속도"에 도달했다고 한다.

따라서 각국에서는 차량의 차륜답면 구배에 대해서는 실험적 연구를 통하여 차륜 답면 등가구배를 결정하여 관리해 주는데 160 km/h 이하 차량에 대해서는 차륜의 마모측면에서 차량 플랜지 각부 치수기준에 의거하여 관리만 해주고 있다. 그러나 160 km/h 이상이 되는 준고속 차량에서부터는 차량의 임계속도에 영향을 주지 않는 차륜답면 등가구배를 계산하여 차륜 마모 형상에 따라 차륜 답면 구배 형상관리를 하고 있다. 이에 대한 예를 프랑스 고속철도와 유럽의 고속철도 통합 운행시 차륜 답면 등가구배 관리안을 살펴보면 다음과 같다.

첫 번째 예로, 프랑스 철도청인 SNCF의 고속철도 TGV-A 차량(최고영업속도 300 km/h)의 차륜 답면 등가구배 살펴보면 차륜 종류는 국내 KTX 차량의 계약당시 차륜인 GV 40 차륜이다. 이 차륜의 등가구배는 초기치가 0.025이다. 그러나 운행 시 최고 영업속도 300 km/h에서 안전성을 확보하기 위하여 차륜의 등가구배 한도는 0.3이하로 관리하고 있다.

두 번째 예로, 유럽 EU 국가간 고속철도 통합 운행을 위한 차륜의 등가구배 기준은 고속철도 전용선로와 기존선 연결 운행선을 차량의 속도 영역대로 구분하여 관리하고 있다. 우선 고속철도 전용 선로상에서의 등가 경사도는 표 1과 같다. 또한 기존철도와 고속철도를 연결하여 운행되는 노선에 대하여는 표 2와 같다.

표 1 고속철도 전용선로

속도(km/h)	설계값	운행 후, 차륜과 레일의 마모를 고려했을 때
230 < V ≤ 250	0.25	0.30
250 < V ≤ 280	0.20	0.25
V > 280	0.10	0.15

표 2 기존철도에 고속철도 연결 운행하는 경우

속도(km/h)	설계값	운행 후, 차륜과 레일의 마모를 고려했을 때
160 < V ≤ 200	0.30	0.40
200 < V ≤ 230	0.25	0.35
230 < V ≤ 250	0.25	0.30
N.B : 160km/h 이하의 속도에서는 등가 경사도를 정의하지 않는다.		

위 표에서 보는 바와 같이 유럽 철도에 있어서는 차량 운행 속도가 160 km/h 이상이 되는 철도시스템에 대해서는 반드시 차륜의 등가구배를 반드시 관리해야 하는 항목으로 인식되고 있다. 이에 비해 국내 철도시스템에서는 지금까지 도시철도 및 기존철도 공히 상업운행 속도가 150 km/h 이하로 운행되고 있어서 차량의 주행안정성 평가 항목에서 차륜의 답면 등가구배 항목이 빠져 있었던 것이 사실이다. 그러나 국내에서도 2004년 4월부터 운행 될 경부고속철도 및 호남선 직결 고속철도 운행이 이루어 지면 차륜관리 및 차량 안정성 평가시스템에서 차륜답면 등가구배 기준이 포함되어야 함을 알 수 있다. 이는 국내에서 운행될 KTX 차량의 영업최고속도가 300KM/H 이상이고, 호남선 일부 구간에서 180~200 km/h로 운행될 것을 고려하면 매우 중요한 사항이라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 차량의 주행안전성에 큰 영향을 주는 차륜 답면 등가구배에 대하여 검토하였다. 차륜 등가 구배의 정의 및 등가구배 값에 따른 표현방법, 그리고 차량의 임계 속도에 큰 영향을 끼치는 등가구배의 특성 등을 간단하게 검토하였다. 아울러 프랑스를 포함한 유럽 국가에서의 차륜답면 등가구배 관리시스템에 대하여서도 간단하게 검토하였다. 향후 우리나라에서 운행되거나 개발되어지는 160 km/h 이상 차량에 대해서는 주행안정성 측면에서 차륜답면 등가구배 관리가 반드시 이루어 져야 함을 제언하고자 한다.

후기

본 연구는 한국고속철도건설공단 고속철도건설기술지원사업으로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사 드립니다.

참고문헌

1. "Official Journal of the European Communities", 96/48/EC
2. "Introduction to Railway Vehicle Dynamics", AEA Technolog