

# 곡선 선로에서의 차륜담면과 레일 접촉에 대한 개념적 연구

## Conceptional Study of the contact

### between Wheel tread and Rail on Curve line

이남진\*, 김정하\*, 남학기\*

Lee, Nam-Jin Kim, Jung-Ha Nam, Hak-Gi

---

#### ABSTRACT

To understand the forces that develop in the contact patch between the wheel and rail in the railway vehicle is starting point of studying dynamics of railway vehicle because almost of forces which govern behavior of vehicle came from contact patch.

In this study, phenomenon in the contact patch was tried to understand through conceptional approach, then was reviewed with proven dynamic software.

---

#### 1. 서론

철도차량을 지지하고, 차량이 선로를 따라 운행할 수 있도록 발생하는 모든 힘은 차륜과 레일의 접촉면(contact patch)에서 출발하며, 접촉면에서 작용하는 접촉력 연구는 철도차량의 동특성을 이해하는 기본이 됨과 동시에 그 발전과정이 철도차량 기술의 역사라 할만 하다. 초기의 단순한 차륜과 담면의 기하학적 형상에서 차량의 사양이 높아짐에 따라, 더욱 발전된 차륜의 담면과 레일의 형상이 제시되어 현재의 일반적 형태에 이르렀으며, 접촉문제의 한계는 현가장치 연구로 이어졌다.[1,4]

철도차량의 동역학적 연구는 차량의 곡선통과 성능과 주행 안정성이라는 서로 상반된 특성 사이에서 균형에 초점이 맞춰졌으며, 그 발전은 시험적 경험을 발판으로 무수한 시행착오에서 보다 미세한 그 불균형을 인지하고, 이를 제거/설계하는 방향으로 진행되고 있으며, 이것의 결과물로 상용화 되어있는 다양한 철도차량용 동특성 해석 프로그램을 들 수 있다. 하지만, 철도차량에 대한 동특성에 대한 연구는 아직 완료되지 않는, 진행의 영역이며, 지속적인 개발을 위해 접촉과 같은 기초 연구에 지속적 관심이 요구된다.

이러한 취지로 본 연구는 철도차량의 철제 차륜이 곡선 선로를 따라 운행하는 현상에 대해 개념적으로 접근하고자 하며, 이러한 현상을 상용화 되어있는 철도차량 동특성 해석 프로그램을 통해 그 정량적 이해를 높이고자 한다.

---

\* ㈜로템 주행장치개발팀, 정회원

## 2. 차륜담면과 레일 상면의 접촉

### 2.1 기하학적 접근

윤축(wheelset)의 구성은 일정한 담면 기울기를 가지고, 양 차륜이 차축에 의해 강체로 고정된 형태로 가정하고, 레일의 형상은 직경이 작은 파이프로 가정한다. 이 가정으로 차륜과 레일의 접촉 현상이 현실과 어긋나는 부분도 있으나, 기하학적 접근으로 현상을 단순화하여 개념적 접근에 유용한 가정이다.

담면 경사진 윤축은 그림1과 같이 횡방향 변위에 의해 양 차륜의 반경차가 발생하고, 이 반경차는 직선선로에서는 차축의 횡방향 가진을, 곡선선로에서는 자기 조향기능과 내외측 레일의 주행거리차를 보상하여 준다.  $\lambda$ 가 유효 conicity, 두 차륜의 접촉점간 거리의 반을  $l_0$ ,  $r_0$ 가 차륜 중심의 회전반경,  $y$ 가 그림1에서와 같이 윤축의 횡방향 변위라면, 선로의 곡선반경  $R$ 에서 요구되는 횡변위는 식1과 같고, conicity가 클수록 적은 양의 횡변위가 요구되어 곡선 주행에 유리하다. 하지만, 이러한 기계적 feedback 시스템은 비례제어의 형태로 초기 횡방향 변위를 중심으로 수렴시키지 못하고 지속적인 진동을 유발하며, 차륜과 선로시스템에서의 안전성은 제어공학적인 관점에서 conicity는 비례제어의 gain으로 이해될 수 있다. 이 주파수는 식2와 같이 conicity에 비례하고, 차륜반경과 차륜간 거리에 반비례하는 특징을 가진다. 이 기하학적 진동 주파수가 클수록 차량은 불안정하게 되어, 수치적으로 차량의 직선주행 안정성은 차륜의 기하학적 진동 주파수와 반비례 관계를 갖게 된다.

$$\frac{r_0 - \lambda y}{r_0 + \lambda y} = \frac{R - l_0}{R + l_0} \quad (\text{식1})$$

$$\omega = v \sqrt{\frac{\lambda}{r_0 l_0}} \quad (\text{식2})$$

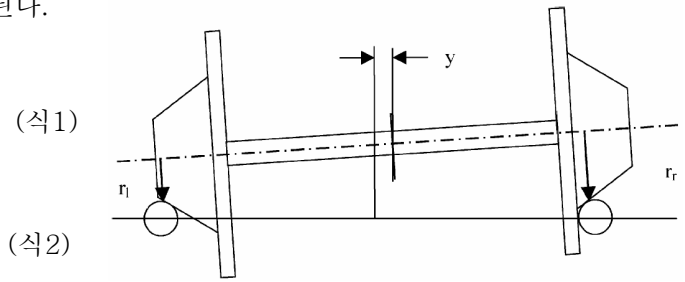


그림1. 윤축 단순화도

### 2.2 상호 접촉력

차륜과 선로의 접촉은 곡면과 곡면의 접촉으로 기하학적으로는 접촉점 형태로 나타나지만, 접촉점 부근의 탄성변형으로 접촉면(contact patch)가 발생하고, 이 접촉면에서 수직력과 수평력이 생성, 차륜과 차량에 상호작용한다. 접촉면에 대한 가장 일반적인 접근은 Hertz이론에 기반을 두고 있다.

접촉면에서 차륜과 차축은 제동과 추진, 그리고 앞 절에서 언급했던 기하학적 조향으로 미세한 미끄러짐이 발생하고, 이 미끄러짐으로 인해 수평 접촉력이 발생하는데, 이것을 각각 크립(creepage), 크립력(creep force)이라 한다. 차축에서의 creepage는 아래 (식3)과 같이 3방향으로 정의 될 수 있으며, 크립량과 크립력의 관계에 대한 다양한 이론들이 제시되어 있다. [

$$\text{Longitudinal creepage: } \gamma_1 = \frac{v'_1 - v_1}{v}, \text{ Lateral creepage: } \gamma_2 = \frac{v'_2 - v_2}{v} \quad (\text{식3})$$

$$\text{Spin creepage: } \omega_3 = \frac{\Omega'_3 - \Omega_3}{v},$$

단,  $v_1, v_2, \Omega_3$ 는 각방향 실제 속도,  $v'_1, v'_2, \Omega'_3$ 는 차량속도에서 발생한 계산치이다.

## 2.3 곡선통과에 대한 서술적 기술

### 2.3.1 공격각

대차가 곡선을 통과할때, 차륜과 대차는 1차현가장치의 현가특성의 영향으로 선행차륜은 곡선선로 밖으로 향하는 공격각(attack angle)이 발생하고, 후행차륜은 곡선선로 안쪽으로 향하는 공격각이 발생한다. 선행차륜의 경우 외곽으로 향한 공격각으로 차륜과 선로의 접촉면 사이에 구심력방향의 크립력이 발생하고, 공격각에 의한 크립력에 대한 힘의 균형을 위해 바깥쪽 차륜에 큰 플렌지 접촉력이 요구된다. 그리고, 주행방향의 접촉력은 외측차륜의 플렌지 접촉을 가정하였을때, 외측 차륜의 접촉 반경(rolling radius)이 증가와 함께 내측 차륜의 접촉 반경은 감소하여, 두 반경차이로 강체 차륜(rigid wheelset)은 외측 차륜에는 주행방향의 크립력(longitudinal creep force)이 발생하고, 제동력 혹은 추진력이 없는 타행으로 가정하여 내측 차륜은 주행 같은 크기의, 반대방향의 크립력이 발생하며, 이것은 차륜의 요(yaw)모션을 유발, 차량 안전성을 불안하게 하는 요소로 발전할 수 있다.

후행차륜의 경우는 공격각이 곡선 내측을 향하고 있으며, 횡방향 크립력이 곡선 내측으로 향하고 있다. 따라서 후행차륜은 캔트부족량에 의한 영향이 크지 않는한 플렌지 접촉이 없다.

대차의 yaw 방향 힘의 균형은 선행차륜의 주행방향 크립력에 의한 모멘트와 전후위 차륜 횡방향 힘(ripape force)의 차에 의한 모멘트가 균형을 이루워야 하며, 이 모멘트는 신조 차륜보다 마모차륜에서 더 크게 나타난다.[1]

공격각은 차량과 선로의 여러 변수로 결정되며, 그 대략적인 경향으로 대차의 1차 현가장치 주행방향 강성이 클수록, 답면 conicity가 작을 수록, 윤축간 거리가 멀수록 공격각은 커져 곡선주행 안정성을 떨어뜨린다. 하지만, 공격각이 큰 차량 시스템은 그만큼 직선주행에서 안정적으로 주행을 할 수 있다는 의미이며, 단순 치수설계로 직선주행과 곡선주행의 성능을 모두 만족시키는 데는 한계가 있다. 이러한 이유로 자기조향대차, 혹은 강제조향대차가 제안되고 있다.

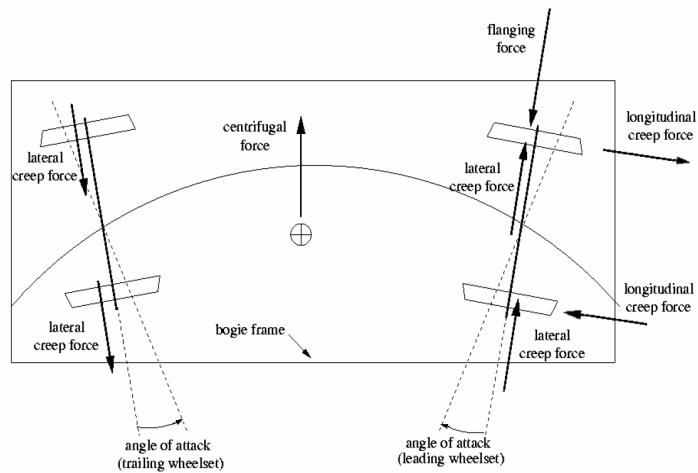


그림2. 곡선상 차륜 선로간 접촉력

### 2.3.2 회전저항

대차의 회전저항(rotational resistance)은 차체에 대한 대차 yaw motion에 대한 복원력으로 곡선상에 차량이 주행할때, 대차가 선로의 접선방향으로 놓일 수 있도록 차체와 대차간의 적절한 회전운동이 유도되며, 이때의 회전저항에 의한 복원력은 대차 모멘트의 평형을 위해 차륜접촉력에 추가적인 횡방향 힘이 발생된다. 회전전향으로 전후위 대차가 대칭으로 발생함으로, 선

두 대차에서는 공격각에 의한 차륜의 횡방향 힘을 증가시켜 차량의 탈선 및 차량 안전성을 악화시키고, 후위 대차에서는 공격각의 영향과 회전저항의 영향이 상쇄되어 선두대차가 차륜 마모 및 탈선의 위험에 더욱 노출됨을 알 수 있다.

회전저항에 대한 무차원변수는 x-factor라 칭하고, 적절한 승차감과 낮은 플렌지 마모를 위해 0.03~0.05의 값을 ORE B6에서 추천하고 있으며, 차량의 조건과 차량의 구조에 따라 그 한계가 조금씩 차이가 난다. 이와 유사한 시험연구과제에서 승차감과 차륜마모의 저감을 위한 차량의 특성을 차륜~선로간 저항력과 대차~차체의 저항력 비율 0.1에서 0.12로 제안하고 있으며, 이 값은 ORE B6에서 제시하는 값과 대략 일치하고 있다.[3]

회전저항과 탈선계수와의 관계를 직접적으로 비교하는 것은 회전저항이 탈선에 미치는 정량적 영향을 간접적으로 이해할 수 있으며, 그예로 0.1의 X-factor는 Y/Q(탈선계수)에 0.2정도의 차륜 횡압을 정상적으로 증가시키는 효과가 있으며, 곡선을 주행하는 차량에서는 차륜의 공격각과 회전저항력이 동일 차륜에서 증폭될때 해당 차륜의 탈선 위험성을 증가된다.

### 2.3.2 Wheel unloading

곡선 주행에서 윤증감소율은 완화곡선상 선로꼬임에 의한 것으로, 한 차량의 차축은 그림3과 같이 놓이게 되며, 차량은 선로에 의한 토션과 이에 저항하는 차량토션 강성으로 차축당 하중은 평탄선로에서의 값과 차이를 보이게 된다. 차륜 안전성의 기준인 탈선계수는 차륜 플렌지 접촉시 수직력과 수평력의 비로써, 동일한 차륜 횡압에서도 wheel unloading에 의한 수직력이 감소는 탈선계수를 증가시킨다. 정적 평형 상태에서 차륜하중은 선두 바깥쪽 차륜과 대각관계의 차축이 증가하고, 그 외 차축은 감소하는데, 이것은 그림2에서 플렌지 접촉이 있는 차륜에 하중증가가 발생하여, 결과적으로 탈선계수가 낮아지는 효과가 나타난다. 일반적으로 wheel unloading은 탈선계수와 비례관계가 있는 것으로 검토되고 있는데, 이는 정적 상태가 아닌 초기 wheel unloading에 의한 진동 효과가 차륜의 횡압 증가와 증첩이 발생하였을 때 차량의 안전성이 가장 위험한 순간으로 검토한 결과라 예상된다.

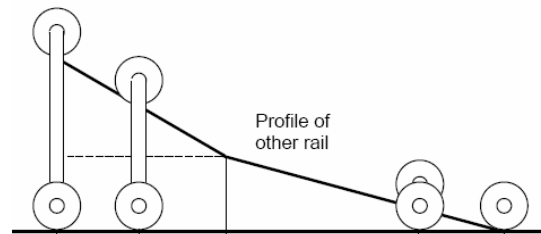


그림3. 완화곡선상 차량 단순화도

### 3. 곡선 주행 시뮬레이션

일반적 차량을 모델로 곡선 주행 시뮬레이션을 통해 개념적 사항을 정량적으로 확인해 보고자 한다. 사용한 software는 Vampire이다. 차륜 답면 형상은 원호답면에 선로는 KS규격 50kgN을 적용한다. 곡선은 50m까지 직선, 150m까지 완화곡선, 그 이후는 캔트가 있는 완전곡선 선로로 별도의 선로 불규칙도는 적용치 않는다.

그림 4,5,6은 곡선 주행하는 차량의 탈선계수, wheel unloading, 횡압을 시뮬레이션 한 결과이며, 차량의 안전성 검토에서 가장 주요한 차축은 선두 첫 차축임을 알 수 있으며, 이는 개념적 접근에서와 동일한 결과로 여겨진다.

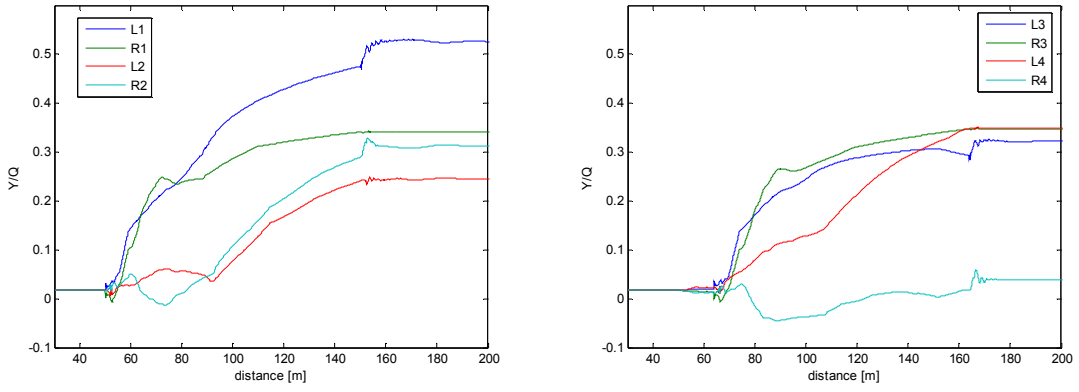


그림4. 차륜별 탈선계수

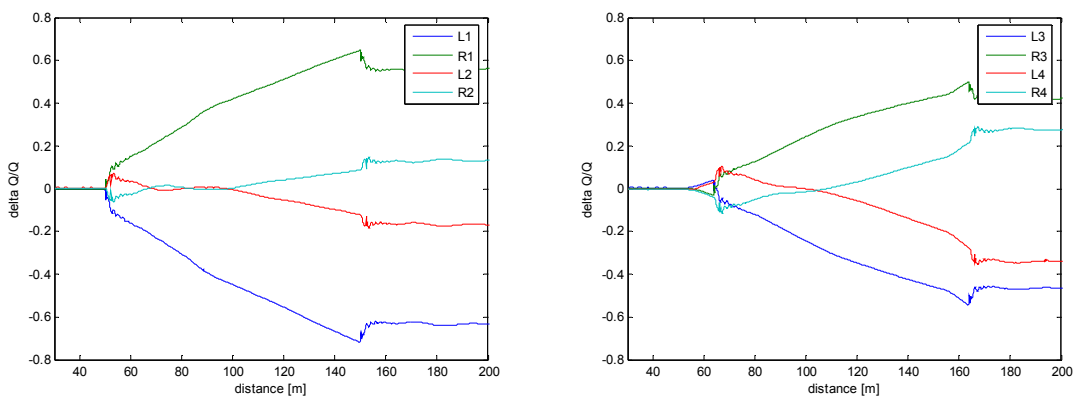


그림5. 차륜별 wheel unloading

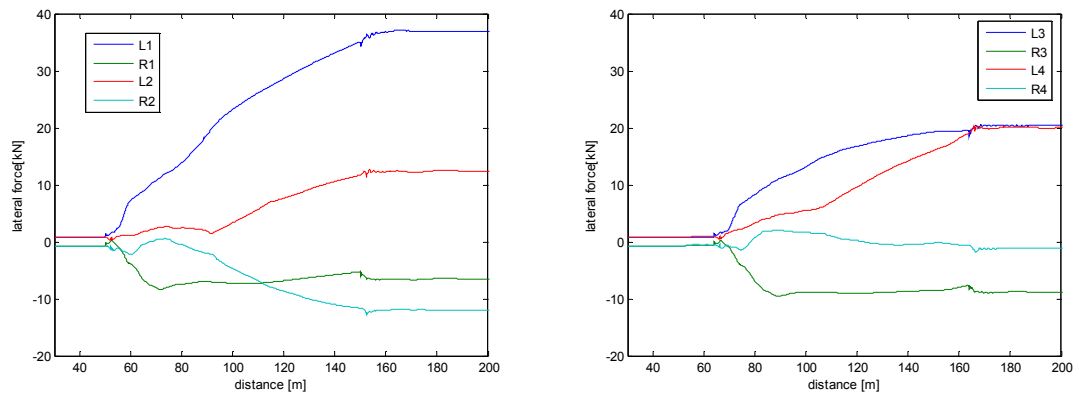


그림6. 차륜별 횡압

#### 4. 결론 및 향후 연구방향

곡선 선로에서의 차륜과 레일의 거동에 대한 현상을 개념적으로 접근하고자 하며, 이러한 현상을 상용화 되어있는 철도차량 동특성 해석 프로그램을 통해 확인하여, 그 일반적 경향을 확인할 수 있었다. 향후 차륜 접촉 이론의 이해와 실제 현상에 관한 비교연구를 진행하고자 한다.

## 참고문헌

- [1] G. Diana, S. Bruni, F. Braghin, "Wheel-Rail Contact:Wear effects on Vehicle Dynamic Behaviour", 2nd World Tribology Congress, 2001
- [2] ORE B55 Committe, "Prevention of derailment on track twists", Report No. 8 1983
- [3] J.L. Koffman, " Rotaional Resistance of Bogie Wagons"
- [4] 임진수, “철도 차량의 동역학 – 헌팅과 주행 문제의 역사-”, 한국소음진동공학회지, 제9권 제3호, 425~430p, 1999