

철도차량의 탈선 메커니즘



| 함 영 삼 |
한국철도기술연구원
책임연구원

1. 서론

‘탈선’이란 사전적으로 기차나 전차 따위의 바퀴가 궤도를 벗어나는 것을 의미한다. 철도차량의 주행안전성을 저해하는 중요한 요인은 탈선이다. 여기에서는 탈선에 관련된 용어의 정의와 탈선메커니즘에 관한 최근의 연구동향, 그리고 차량 측에서의 탈선대책 등에 대하여 서술하고자 한다.

2. 용어의 정의

2.1 탈선계수

차량이 주행할 때 레일과 차륜은 차량의 하중 외에 주행시의 복잡한 운동으로, 차륜은 레일에 수직방향의 힘과 수평방향의 힘을 작용시킨다. 이 수평방향의 힘(횡압 Q)에 대한 수직방향의 힘(윤중 P)의 비(Q/P)를 탈선계수라 하며 이 값이 일정치를 넘으면 차륜이 레일을 올라타거나 뛰어넘어 탈선을 하게 되므로 주행안전성 검토의 기준이 된다. 탈선계수의 해석은 정적해석과 동적해석으로 구별되며 [그림 1]과 같은 상태에서의 정적해석은 접촉점에서 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\left(\frac{Q}{P}\right) = \frac{\tan\alpha \mp \mu}{1 \pm \mu \tan\alpha}$$

여기서, Q : 횡압

P : 윤중

α : 플랜지 접촉각

μ : 마찰계수

위의 식에서 분자의 -와 분모의 +는 타오르기 탈선, 분자의 +와 분모의 -는 뛰어오르기 탈선을 나타내고, 이것은 차륜이 레일을 미는 힘, 즉 횡압의 작용시간으로 구별하여 1/20초 이하를 뛰어오르기 탈선, 1/20초 이상을 타오르기 탈선으로 적용한다.

2.2 윤중

2.2.1 정적윤중(P)

차량의 진동에 의한 영향이 없는 경우의 윤중으로 차량의 자중에 따라 그 크기가 결정되며, 윤중의 기본적인 값은 평탄 직선 구간을 5km/h 정도의 속도로 주행할 때 윤중을 측정하여 수십 개의 평균치를 구한 것으로 한다. 이것은 탈선계수 측정용 윤축의 교정값을 검증할 수 있도록 정확히 구하여야 한다.

2.2.2 윤중감소비($\Delta P/P$)

차량의 진동이나 중심의 편기, 궤도 및 차량의 평면성 틀림, 곡선에서의 캔트 및 원심력, 풍압 등에 의해 윤중의 감소가 발생한다. 이때 윤중 감소치

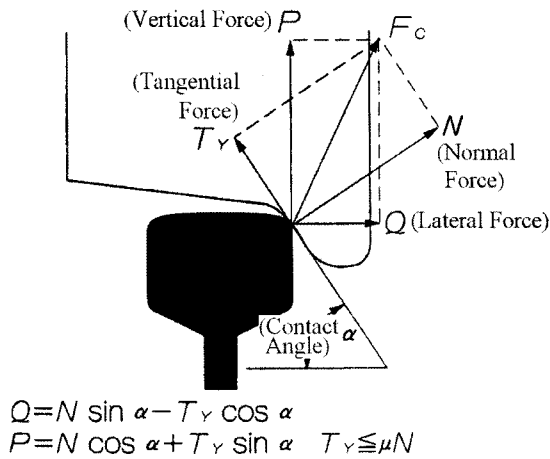


그림 1. 차륜과 레일의 접촉점에 작용하는 힘

(ΔP)에 대한 정적인 윤중(P)의 비를 윤중감소비라 하며 이 값이 허용한도를 초과하면 탈선의 위험이 있다.

2.3 횡압(Q)

정적인 윤중이 차량의 자중만큼만 검출된다면 횡압은 0이라고 볼 수 있다. 그러나 차량이 주행하게 되면 윤중감소가 발생하고 아울러 차륜 플랜지와 레일의 접촉으로 횡방향 하중이 발생하는데 이것을 횡압(Q)이라고 부른다. 어떠한 경우에도 횡압이 윤중보다 커지게 되면 탈선의 위험성은 그만큼 높아지는 것이다.

3. 탈선 메커니즘 연구동향

3.1 지금까지의 연구동향

주행안전성의 핵심요소인 탈선의 위험성을 평가하는 방법으로 널리 사용하고 있는 Nadal의 이론에 의하면 탈선계수 한계치는 차륜과 레일간의 마찰계수에 의존하고 있다. 실제로 차량이 주행할 때 마찰계수는 시시각각으로 변화하기 때문에 직접적으로 마찰계수를 측정하는 것은 거의 불가능에 가깝다. 대신, 세계 각국에서는 회전체 로드셀로서 탈선계수 측정용 윤축을 만들어 주행안전성 평가에 사용하고 있다. 철도분야에서 이러한 기술은 핵심적인 보호 기술로서 쉽게 공개되지 않고 있으며, 오로지 자국의 이익에 관계될 때에만 부분적으로 공개하면서 판매목적으로

활용되고 있는 실정이다. 고속전철 기술 보유국인 프랑스와 독일 등에서는 차량의 종류를 제안하면 맞춤식으로 측정용 윤축을 제작하여 공급하고 있으며 심지어는 측정용 윤축의 제작과 더불어 측정과 분석을 일괄적으로 처리하도록 유도하고 있는 형편이다.

지금까지 철도차량의 동역학 해석을 위하여 국내에서 개발된 각종 전산 프로그램들이 많이 있지만 이와 같은 각종 프로그램들은 실제 설계에 반영하는데 많은 제약사항을 갖고 있었던 것이 사실이다. 이들 프로그램은 차량모델로부터 운동방정식을 직접 유도하기 때문에 프로그램에 오류가 포함되어 있을 가능성이 높을 뿐만 아니라 국내 여건상 각종 차량 물성치나 궤도특성을 정확하게 확인하기 곤란하므로 계산 결과만 가지고 프로그램의 신뢰성 확인을 하기가 매우 어렵다. 특히 이와 같은 전산 프로그램은 시험을 통한 확인이 필수적인데도 이러한 과정을 거치기가 어려워 국내의 전산 프로그램은 실용화에 한계를 갖고 있는 실정이었다. 그러나 국책사업으로 한국형 고속전철을 개발하는 과정에서 산학연이 연계하여 활발한 연구를 진행하면서 이러한 난관을 상당부분 극복하였으며 세계적인 기술수준과의 격차를 급속도로 좁혀가고 있는 실정이다. 철도차량의 동역학 해석은 일반적인 기구학 해석을 위한 다물체 동역학(Multibody Dynamics) 이론과 차륜/레일의 접촉에 의한 작용력 계산 이론이 있다. 차륜과 레일의 상호 작용력은 Kalker에 의해 제안된 이론이 보편적으로 사용되며 이는 Herzian Contact 이론을 기본으로 차륜과 레일의 형상으로 인한 접촉특성을 Creepage Coefficient라는 변환상수로 제안하고 있다.

최근에는 동역학 해석의 상업용 프로그램들이 많이 개발되어 사용되고 있으며 다물체 동역학으로 불리우는 이러한 전산기법은 사용자가 운동계의 미분방정식을 직접 유도하지 않고 단지 계의 구성요소(질량, 강성, 댐핑, 비선형 특성 등)만을 정의하여 주면 프로그램 스스로 운동방정식을 수립하여 해석하는 기법으로 미국의 ADAMS, 독일의 MEDYNA 및 SIMPACK등이 세계적으로 널리 사용되는 소프트웨어로 알려져 있다. 철도차량 동역학 해석에 이와 같은 상용 프로그램의 적용도 일부에서 시도되었으나 철도차량 특유의 차륜/레일 상호관계 해석기법의 복잡성 때문에 활발하게 사용되지는 못하고 있는 것으로 알려져 있으며, 이러한 이유로 여러 철도 선진국에서는 철도차량 전용

의 동역학 해석 프로그램을 만들어서 시판하고 있는데 대표적인 프로그램으로 미국의 NUCARS와 영국의 VAMPIRE가 소개되고 있다.

철도차량의 주행안전성을 확보하기 위하여 이론해석과 더불어 시험을 통한 주행안전성 평가는 필수적인 과정이라 할 수 있다. 세계 각국들이 모두 실차주행시험으로 탈선계수를 만들어 평가하고 있으며, 국내에서 가장 보편적으로 사용하고 있는 방법은 [그림 2]와 같은 탈선계수 측정용 윤축을 만들어 실차주행시험으로 평가하는 방법이다. 탈선계수를 북미에서는 L/V, 유럽에서는 Y/Q, 일본에서는 Q/P 라고 나타내고 있지만 모두가 똑같이 수평방향하중/수직방향하중의 비율을 의미하고 있다. 유럽에서는 2m 주행하는 사이의 탈선계수 평균치를 0.5m마다 산출하여 일정주행거리의 이동 평균치를 사용하고 있는데, 이것은 단시간에 변동하는 탈선계수 최대치를 무시하고 주행속도가 높을 때 단시간의 동적현상을 고려하는 방법이지만 이론적 근거에 기초했던 것은 아니며, 저속에서 차륜 플랜지가 타고 오르는 실제차량의 탈선실험 결과가 기초가 되고 있다.

3.2 최근의 동향

3.2.1 연속적인 탈선계수 측정법

지금까지 윤중과 횡압을 측정하는 방법에는 간헐법과 연속법이라고 불리는 2가지의 방법이 이용되어 왔다. 그러나 간헐법은 차륜 1회전에 최대 4회의 측정치밖에 얻을 수 없었고, 연속법은 횡압에 대하여 연속된 출력을 얻을 수 있기는 하지만 출력이 작아서 차륜의 열변형과 노이즈

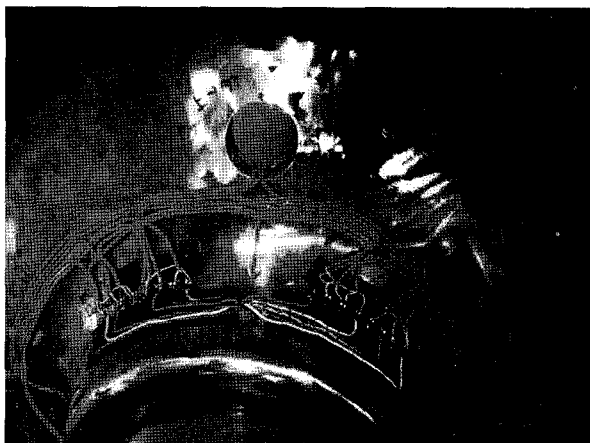


그림 2. 탈선계수 측정용 윤축

에 의하여 감도가 떨어지고 영점이 이동하여 출력된 윤중의 음과 양이 반전되는 경우도 있다는 결점을 가지고 있다. 이것은 브릿지 회로 내에 스트레인 게이지가 많기 때문에 변형에 대한 저항값의 변화가 상대적으로 작다는 점이 원인이다.

차량의 속도향상과 함께 윤중의 변동이 증대하고 이에 의해 윤중감소와 횡압 발생이 중복되면, 종래의 안전한도인 0.8을 넘는 탈선계수가 관측되는 경우가 있다. 이런 경우의 윤중 변동은 축상의 진동가속도부터 약 60Hz 이상으로 추정되는 고주파 영역으로, 레일 표면의 작은 요철이 그 발생 원인인 것으로 추정되고 있다. 이것들의 현상을 정확히 파악하기 위해서는 종래의 간헐식 측정방법으로는 불충분하고, 윤중과 횡압이 완전히 연속적으로 출력될 수 있는 측정법이 필요하게 되어, 일본과 유럽 등에서는 이러한 연속 측정법을 개발하여 사용하고 있다.

3.2.2 차축의 굽힘하중에 의한 윤중 계산

탈선계수 측정용 윤축을 제작하기 위한 구조해석, 가공, 스트레인 게이지 부착, 브릿지 결선, 정하중시험 등의 과정

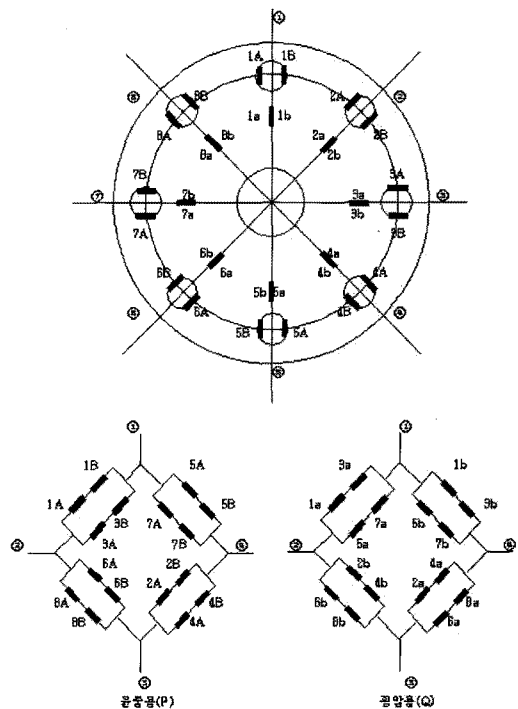


그림 3. 연속식 측정법의 게이지 부착위치와 결선도

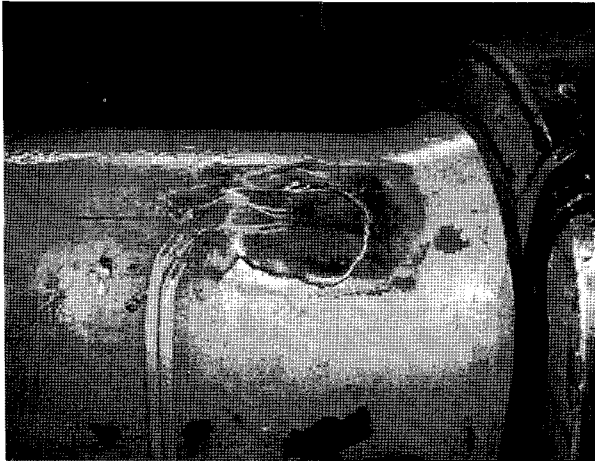


그림 4. 굽힘하중 검출용 스트레인 게이지

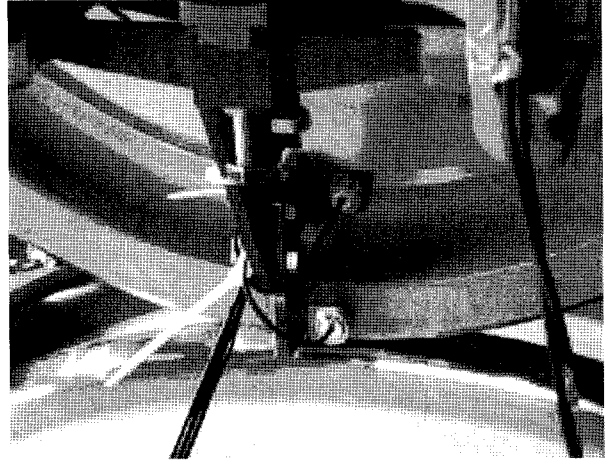


그림 6. 횡압 측정용 비접촉 갭 센서

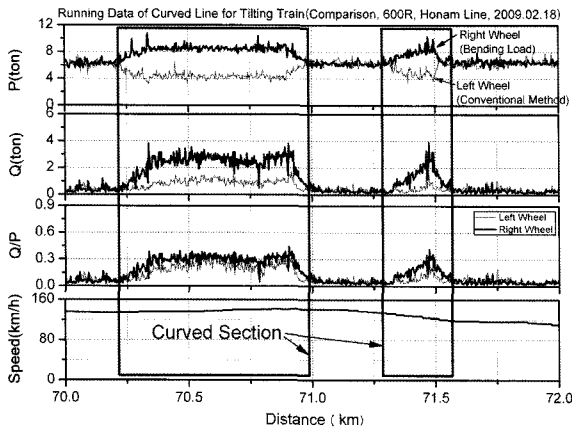


그림 5. 기존방법과의 시험결과 비교

은 지금까지의 작용력 측정방법과 동일하다. 다만, 굽힘하중 검출용 스트레인 게이지를 [그림 4]와 같이 부착하여야 하고 교정값을 산출할 때 윤중과 횡압이 굽힘응력에 어떠한 영향이 미치는가를 정확히 파악하여야 하는 점이 다를 뿐이다. 굽힘응력에 미치는 영향은 횡압이 윤중의 1.5배 정도로서 훨씬 더 크게 작용한다는 것을 확인한 바 있다. 윤중과 횡압 중에서 측정이 더 용이한 항목은 차륜면에 구멍을 뚫지 않아도 되는 횡압이기 때문에 횡압을 지금까지의 접촉력 측정방법대로 측정하고 굽힘하중 검출용 스트레인 게이지의 출력에서 횡압에 의한 영향을 제거하면 윤중이 산출된다고 할 수 있다.

윤중과 횡압 및 굽힘하중과의 관계식을 이용하여 호남선 일부구간에서 탈선차량으로 주행안전성을 측정하여 비

교한 결과는 [그림 5]와 같다. 그래프는 우측 차륜이 외궤측에 해당하는 곡선부를 통과할 때 외궤측의 윤중을 굽힘하중으로부터 환산하고 내궤측은 기존의 방법으로 측정한 결과인데, 직선부에서는 양쪽 차륜의 윤중이 비슷하지만 곡선부에서는 내궤측 윤중은 감소하고 외궤측 윤중은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 굽힘하중에 의한 윤중 또는 횡압이 실제 접촉력과 잘 일치하는 것을 의미한다.

3.2.3 비접촉 센서 이용법

지금까지 차륜과 레일의 접촉력을 측정하기 위해서는 특별한 도구가 필요하였다. 회전체인 차륜에 스트레인 게이지를 부착하여야 했고, 이 신호를 고정체로 전달하기 위해서 슬립링이나 텔레메타가 장착된 특별한 측정용 윤축을 제작하여야만 하였다. 이러한 도구들은 가격이 비싸고, 내구성과 신뢰성 문제 때문에 자주 사용하기가 어려웠던 것이 사실이다. 일본과 유럽에서 소개되고 있는 방법들은 살펴보면 수평방향 하중(횡압)을 측정하는 데에는 광섬유 센서를 이용하여 차륜의 변위를 계측하고, 수직방향 하중(윤중)을 측정하는 데에는 레이저 센서를 이용하여 대차 프레임이나 1차 스프링의 변위를 계측하는 것으로 축약되고 있다. 우리 연구원에서도 국제공동연구사업으로 유사한 프로젝트를 수행하면서 검증해 본 결과, 횡압의 측정은 실용화가 가능하지만, 윤중의 측정에는 아직도 해결하지 못하는 부분들이 존재하고 있음을 알 수 있었다.

4. 차량에서의 탈선대책

탈선은 여러 가지 문제가 복합적으로 작용할 때에 비로소 발생한다. 여기에서는 차량의 측면에서 생각해 볼 수 있는 탈선대책을 서술하고자 한다.

(1) **궤도와 차량의 관계**는, 레일과 차륜 사이의 횡압, 운중, 횡압/운중비(및 차량진동)으로 관리되고 있다. 이것들은 새로운 설계차량의 시험 및 속도향상시에 측정되고, 또 궤도의 검사시에 측정하여, 일정 기준치 이하인 것을 확인하고 있다.

현재, 횡압/운중비는 0.8이하를 기준치로 하고 있지만, 지금까지는 연속 측정이 가능하지 않았던 것에 다소 문제가 있었다. 최근, 연속측정법의 개발이 일부에서 시도되고 있다.

(2) **사행동**은, 좌우일체 구조의 운측에서 차륜 답면에 경사를 주기 때문에 발생한다. 사행동은 횡압을 발생시키고 횡압/운중비를 크게 하는 위험이 있기 때문에, 사행동을 방지하도록 다양하게 연구한 대차를 설계·제조하고, 원형을 유지하도록 보수하여야 한다.

(3) **곡선통과속도**는 궤간과 곡선반경과 차량중심높이의 관계에서 구해지는 전복한계속도에 높은 안전율(일반적으로 3배)을 취하여 정하고 있다. 차량의 중심높이를 낮게 하는 것은 이런 경우 중요한 요소가 된다.

(4) **완화곡선의 길이**는, 캔트가 있는 곡선과 직선을 연결하는 부분으로 차량의 대차가 3점 지지가 되지 않도록 승차감을 고려하여 정해지고 있다. 대차가 3점 지지가 되면 탈선의 우려가 발생하지만, 저속일 때가 많기 때문에 위험성은 낮다.

(5) **분기기**에서는 차륜의 플랜지 두께가 얇게 되면, 포인트 부에 끼어 들 우려가 있다. 크로싱 부에서는 운중 감소가 생기기 때문에 가드레일에서 보호하고 있다. 따라서 플랜지의 두께와, 좌우 차륜의 간격을 정기적으로 관리하여야 한다.

(6) **차륜 플랜지의 마모**는 곡선에서 플랜지가 레일에 접촉해서 발생하지만, 사행동 방지책의 하나인 대차의 선회저항을 크게 하는 방편에 따라 촉진되고 있다. 더욱, 조타기구가 없는 대부분 대차의 축상 지지 방식에서는, 플랜지와 레일의 접촉은 심화될 수밖에 없다. 플랜지가 마모되면 사행동이 발생하기 쉬워진다. 이 때문에 레일 또는 플랜지

에 도유하는 경우가 있다. 또 최근에는 조타 기구를 갖는 대차가 검토되고 있다.

(7) **주행장치**는 운측과 대차프레임, 기초제동장치, 구동장치 등으로 구성되고 있어, 이것들의 구조적 파손은 위험한 사고가 발생할 우려가 높다. 대차의 균열, 차축의 절손, 차륜의 균열, 타이어의 이완, 베어링의 발열, 기어박스의 낙하 등이다. 특히 차축의 예를 들면, 차축과 차륜이 접촉하는 부분에 플레테인 피로 등에 의해 발생하는 균열의 진행 속도가 아직도 명확히 되고 있지 않기 때문에, 해외의 고속전철에서는 경험적으로 정기검사 때에 차륜을 빼내고, 자분탐상검사를 하여, 깊이 0.15mm 이상을 폐기하고 있다. 플레테인 피로 이외의 손상에 관하여도 초음파 탐상이나 자분탐상으로 검사를 하고 있다. 설계에 있어서는, 허용응력에 의한 차축의 강도 설계를 하고 플레테인 부식이 발생하기 어려운 구조와, 균열이 발생하고도 그것이 넓어지지 않도록 고주파 소입을 하고, 표면에 압축잔류응력을 부가하게 하고 있다. 보통 철도차량에서는 초음파탐상과 자분탐상에 따라 깊이 0.1mm 정도, 길이 1mm 정도까지의 균열 발견에 노력하고 있다.

(8) **차체하부 기기류의 낙실**도 위험하다. 체결볼트에는 전조나사를 쓰고, 선로상의 장애물에 대하여는 선두 차량에 배장기를 마련하고 있다.

(9) **횡풍**에 의한 전복 방지에 관하여는, 풍속과 차체 측면면적과의 관계에서, 속도 제한 또는 운전 규제를 하여야 한다. 교량 등에서의 바람의 거동과 차체 단면 형상에 의한 영향이 연구되고 있다.

(10) **속도초과**나 신호 오동작에 대한 대책으로서 ATS나 ATC 또는 ATO 등이 채용되고 있으며, ATC나 ATO 장비가 설치되어 있지 않은 차량에서는 분기기나 곡선통과속도의 제한은 운전사에 의해 지켜지고 있다. 새로운 차량에서는 모니터링 시스템으로 운전사에게 주의를 환기시키는 경우도 있다.

(11) **연속해서 내려가는 급구배**를 주행하는 열차는 비상정지가 가능한 속도로 제한하는 속도제어브레이크를 사용하지만, 연속해서 차륜답면 브레이크를 쓰는 것은 위험한 경우가 있기 때문에, 전기 브레이크나 엔진 브레이크가 사용되고 있다.

(12) **추진운전에 의한 열차의 좌굴현상**은 탈선의 우려가 있다. 일반적으로는 속도 제한을 두고 있다.

5. 향후 연구방향

탈선에 관한 문제는 횡압을 제거함으로써 모든 문제를 해결한다 해도 과언이 아니다. 그만큼 윤중감소보다 횡압의 증가가 위험하다는 것을 의미하기도 하지만, 차륜의 마모저감이나 레일의 유지보수주기 연장 등 매우 많은 문제에 횡압이 관여한다는 것을 의미한다. 탈선사고는 자주 발생하지는 않지만 한번 발생하면 치명적인 대형사고로 연결된다. 그러한 사고는 차량뿐만 아니라 궤도, 전기신호 등 여러 시스템이 복합적으로 원인을 제공하는 것이므로 차량 측면에서는 횡압의 저감이 가장 큰 당면과제라고 할 수 있다. ☺

♣ 참고 문헌

1. J. J. Kalker(1967), "On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction", Doctoral Dissertation, Technische Hogeschool, Delft, Netherlands.
2. J. J. Kalker(1980), "A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact", Internal Report, Delft University of Technology, Department of Mathematics, Delft, Netherlands.
3. International Union of Railways(2005), "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Ride quality", UIC CODE 518, 3rd edition
4. Akira Matsumoto, Yasuniro Sato, Hiroyuki Ohno, Masao Tomeoka and et al.(2006), "A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations", 7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, pp.371-377
5. Young-Sam Ham, Jai-Sung Hong and Taek-Yul Oh(2006), "A study on the evaluation methods of running safety for railway vehicle", Key Engineering Materials, Vols. 321-323, pp. 1499-1502.
6. Young-Sam Ham(2009), "A study on calculation of contact forces between wheel and rail generated by bending load transmitted by axle of rolling stocks", Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology 2009(ASPEN 2009).
7. 石田 弘明(2009), "輪重・横壓の連続測定", RRR, Vol. 66, No. 2, pp.34-35
8. 金元 啓平(2009), "鐵道車輛の走行安全性を測る", RRR, Vol. 66, No. 6, pp.2-5