

궤도 기술의 연구 개발 동향



서 사 범
(한국고속철도건설공단 궤도
처장/공학박사·철도기술사)

1. 서 언

2 열의 레일을 침목에 일정한 간격으로 고정한다고 하는 궤도의 구조는 철도의 발상 직후부터 현재에 이르기까지 기본적으로 변하지 않고 있다. 궤도는 옥외에 건설되는 장대한 선형 모양의 구조물이며 자연의 영향을 항상 받아 때로는 재해를 받아 파손되는 것도 피할 수 없는 점에서 취약하게 보이지만, 극히 유연성이 높은 궤도 구조가 채용되어왔다고 하는 사정이 있다. 그러나, 대형화, 고속화, 고밀도화 등 차량의 운전 성능 향상에 따라 궤도는 그 기능을 점차 향상시켜 왔다.

궤도 기술에 관한 연구 개발의 목표는 ① 철도의 장래를 위한 연구 개발, ② 실용적인 기술 개발, ③ 철도의 기초 연구, ④ 부상식 철도의 기술 개발을 기본으로 하여 다음과 같이 설정할 수 있다.

- 신뢰성이 높은 철도 (안전성, 안정성)
- 저비용의 철도 (경제성)
- 매력적인 철도 (속달성, 편리성, 쾌적성)

· 환경과 조화한 철도 (환경 친화성)

이들의 4 항목은 서로 밀접하게 관계하고 있으며 그 전체 모습을 나타내는 것은 용이하지 않지만, 본고에서는 “철도”를 “궤도”로 치환하여 궤도 기술에 관하여 세계에서 진행되고 있는 최근의 연구·개발 동향을 소개한다.

2. 신뢰성이 높은 궤도 (안전성, 안정성)

2.1 안전한 궤도

안전하고 쾌적한 열차 주행을 실현하는 것은 궤도 본래의 목적이다. 지금까지 고속화에 따른 새로운 궤도틀림의 관리 지표나 기준치·목표치를 도입하여왔지만, 안전성 확보에 중점을 둔 관리 기준치의 검토가 필요하므로 이에 관하여 차량 주행 시뮬레이션 기술이나 실측 데이터 등의 해석을 통하여 검토하고 있지만, 안전성 확보 판단 기준의 설정이 과제로 남아 있다.

궤도 좌굴 안정성의 해석 기술과 평가 방법에 대하여는 3차원 좌굴 안정성 해석의 도입이나 최저 좌굴 강도 고려 방법 변화 등의 움직임이 있다. 실무 면에서 장대레일 관리 방법 등의 개선에 의한 효율화의 요구가 높고, 새로운 고려 방법·해석 방법의 도입에 의한 검토가 기대된다. 궤도 틀림과 차량 운동의 관계 해석은 올라탐 탈선의 현상 해명이나 승차감 개선, 궤도틀림 관리지표 심도화 등의 중요한 과제에 연결된다.

2.2 급곡선의 탈선 방지와 마모 방지

급곡선부의 저속 주행 시 올라탐 탈선 메커니즘의 해명, 차량·궤도의 설계·보수 기준의 제안을 목표로 실제 차량 주행 시험을 포함하여 종합적인 연구를 진행하고 있다. 상하 축 스프링 정수와 축중(차량 중량)의 관계에는 차량 설계의 “목표 값”이 있으며, 주행 안정성을 고려한 궤도·차량의 설계에서는 이들의 관계로부터 ① 궤도의 축중 제한, ② 바람에 의한 전도 한계, ③ 올라탐 탈선, ④ 궤도 틀림의 진행, ⑤ 축 스프링 처짐 등을 구한다.

급곡선부 내궤측 레일 상면에 발생하는 파상 마모는 차량의 경량화·편성의 균질화와 함께 대차의 곡선 통과 성능이나 궤도의 상하·좌우 방향의 동적 특성이 복잡하게 관련된 현상이며, 차량이나 궤도 구조의 개량으로 유효한 해결책을 얻기까지는 전향 횡압 저감을 위한 내궤측의 차륜/레일간의 마찰계수 저하 등이 당면 과제이다. 급곡선부 외궤측 레일의 파상 마모는 경량화나 대차 곡선 통과 성능 향상 등의 차량 대책으로 횡압 경감 효과가 확인되고 있지만 레일의 형상·재질의 입장에서의 마모 경감책도 검토하여야 한다.

2.3 레일 손상의 방지

차륜과의 고(高)응력 접촉으로 마모·피로 등이 부

득이한 레일의 수명 평가와 내구성 향상이 가장 중요한 과제이다.

2000년 10월에 영국의 하트필드에서 발생한 탈선 사고나 2001년 10월에 프랑스의 TGV가 재래선 구간을 130 km/h로 주행 중에 탈선한 사고의 원인은 레일 절손으로 보여지고 있다 이 때문에 구미에서는 레일 손상의 방지나 그 이론적 기초로 되는 차륜/레일간의 전동 접촉 피로에 대한 관심이 높아지고 있다. 2001년 11월에 독일의 쾰른에서 개최된 세계철도연구회의에서는 이 문제에 관한 발표가 11건이나 되어 관심 또는 긴급성의 높이를 나타내고 있다.

레일 손상의 최대 요인인 쉐어링 방지 대책으로서 베이나이트 레일의 개발이 진행되고 있다. 이 레일은 통상의 레일보다도 약간 마모하기 쉬운 점에서 쉐어링의 원인으로 되는 전동 피로 층이 성장하기 어렵다. 영업선에 시험 부설하여 일반부 및 용접부의 내구성을 추적 조사중에 있다. 또한, 차륜/레일간의 마모나 윤활이 점착성이나 동적 거동에 미치는 영향에 관한 연구도 진행 중이다. 레일 용접 기술의 중요도는 앞으로 점점 중대할 것이라고 생각된다. 레일 용접 기술의 향상을 위해서는 손상 사례의 축적이 극히 중요하다.

2.4 곡선부의 선형 제원

궤도 선형에 관한 UIC 규정 703 R은 유럽 철도에 대한 최근의 경험을 고려하여 1988년에 개정되었다. 이들 규정에서 권고된 값들은 UIC 표준에 적합한 현대적 유도상 궤도와 최신의 여객 차량에 관련한다.

새로운 선로의 경우에 운영 요건은 설계 단계에서 조화시킬 수 있으나, 기존 선로에 대하여는 속도 향상의 가능성이 대개 제한된다. 즉, 곡선부의 선형 제원은 차량 구조나 운전 조건에 따라 설계 시에 정해진다. 그러나, 철도 설비의 수명은 대단히 길고, 일단 만들어지면 그 개량이 극히 곤란하므로 차량의 대형화나 속도 향상

에 수반하여 어느 시점에는 시스템으로서 밸런스가 나쁜(안전성의 여유가 작은) 상태로 되는 경우가 있다.

외국에서는 철도에 관한 기술상의 기준을 국가에서 정하여 지금까지 철도 구조의 기술적 근거로서 기능을 하여온 철도 구조 규정 등의 기술 기준을 성능 규정화, 배리어프리(barrier-free)화 등의 관점에서 근본적으로 개선하고 있다. 여기에 앞서 “곡선부의 선형 제원에 관하여 주행 안전성의 면에서 검토가 필요하다.

3. 저비용의 궤도 (경제성)

3.1 생력화 궤도 구조의 개발

여명기 이래의 궤도 구조는 레일, 침목 도상 자갈, 흙노반이라고 하는 극히 간단한 구조로 큰 열차 하중을 지지하는 것을 계속하여 왔다. 이 구조는 궤도틀림의 정정이나 궤도 재료의 교환·보수 등의 보선 작업이 부득이 하며, 경영상의 필연성에서 많은 인적·물적 자원을 투입하여 왔다. 그러나, 노동력 부족이나 연선 환경 문제 등의 사회 정세 변화는 보선 작업 수행에 많은 제약을 초래하였다. 보수 작업량·비용에 점하는 비율이 큰 궤도틀림의 정정 등 고상 작업을 배제·축감하는 목적으로 콘크리트 궤도 등 생력화 궤도구조의 개발이 궤도기술 연구 개발의 주요한 과제이다.

3.2 궤도 열화 특성과 대책

전절에서 언급한 궤도 구조의 전체 또는 일부를 교환하는 것에 의하여 도상 작업의 배제·축감을 도모하는 방법 외에 궤도 재료의 손상·열화 대책과 궤도틀림 보수주기 연신책이 중요하다. 궤도 재료의 장(長)수명화는 열차 하중 등에 의한 부하의 해명과 경감책 및 재료 강화의 검토가 필요하다. 궤도틀림 보수주기 연신을 위해서는 동적 열차 하중의 억제나 보수작업

효과를 검토하는 것이 필요하다.

자갈 궤도는 도상 입자 상호의 맞물림에 의하여 저항력을 얻는다. 그 집합체로서 도상부의 변형 특성을 정량화하기 위하여 불연속 변형법을 채용하여 실험 크기 시험 결과에 기초하여 그 적용성을 검토하고 있다.

자갈 궤도의 중요한 구성 부재인 도상 자갈의 성질은 석질, 형상, 입도 분포 등에 따라 특징이 붙여진다. 각각 기분에 따라 관리되고 있지만, 열차의 반복 하중에 따라 자갈 입자의 마모가 진행되는 과정과 그것이 궤도 침하에 미치는 영향에 관하여 연구를 하고 있다.

궤도틀림 진행의 예측은 지금까지 궤도틀림의 시간 경과에 따른 변화를 추적하여 이것을 패턴화하는 방법을 많이 취하여 왔다. 새로운 방법으로서 궤도 구조를 모델화하여 그 위를 차량이 반복하여 주행하는 상황을 컴퓨터 상에서 재현하는 시도가 진행되고 있다. 이것에 의하여 궤도 틀림의 초기 값이 궤도틀림의 진행에 미치는 영향 등의 지식이 얻어지고 있다.

3.3 궤도 검측 기술

보선 작업은 궤도 검측이나 차량 동요의 측정 결과에 기초하여 일정한 기준치·목표치에 대조하여 보수를 결정한다. 궤도 검측에서 3 대차 방식의 결점이었던 고속 주행 안전성의 문제를 해소하기 위하여 2 대차 방식의 검측 장치를 채용하여 영업 열차와 같은 속도로 궤도 검측을 할 수 있게 되었다. 한편, “관성 종거법”은 관성 측정법의 간이(簡易)도와 종거법의 취급 용이(容易)도의 양립을 목표로 한 것이며, 보수용 차량 또는 영업 차량에 장비를 설치하는 것을 전제로 한다.

철도 기반시설 모니터링(RIM)은 자산 관리 시스템(AMS)의 가장 중요한 부분의 하나이다. AMS의 총체적인 관리 능력은 이용할 수 있는 시스템의 품질에 크게 좌우될 것이다. 한편, 궤도에 대한 기반시설, 분기기 및 크로싱의 영향이 상당하므로, 터널·교량·하부구조 층(도상, 보조

도상 및 노반) 등 기반시설 모니터링 및 분기기와 크로싱의 모니터링이 이루어지고 있다. 이탈리아의 철도는 집중 진단 시스템(CEDIAS)을 이용하여 신호 설비, 궤도 및 토목 구조물의 효율에 관한 정보를 리얼타임으로 얻고 있다.

3.4 궤도 보수 계획 책정 지원 시스템

궤도틀림 진행과 그 보수에 의한 개선이 반복되는 자갈 궤도에서는 궤도 상태와 필요 작업량의 예측이 기술적으로도 경영적으로도 중요하다. 의사 결정 지원 시스템은 궤도틀림 정비 작업량의 예측과 멀티플 타이 템퍼 등 보수용 기계의 운용계획 책정의 시스템화가 유용하다. 궤도 보수의 효율화를 목표로 하여 유전적 알고리즘(GA) 등 새로운 방법에 의한 연구 개발을 진행 중에 있다. 동종의 시스템은 세계에서 개발이 진행 중이며 유럽철도연구소(ERRI)가 개발한 ECOTRACK이 실용화를 향하여 각 국에서 시험 사용하는 단계에 있다.

EU 각 국은 EU각료이사회 지령(91/440/EEC, 1991년)에 따라 국가에서 철도사업 경영의 독립, 선로 사업과 수송 사업의 분리(상하 분리), 선로 사용에 관한 국제 수송 사업자의 권리(open access) 등을 결정하였다. 열차운행 회사는 지상설비 회사에 사용료를 지불하여 선로를 사용하므로 지상설비 회사는 적정한 사용료를 설정하여야만 한다. 유럽에서 궤도 보수 계획 시스템은 이와 같은 필요에 강요되어 발전하여왔다고 하는 면도 있다. 기본적으로는 경험 법칙에 기초하여 수많은 알고리즘으로 판단·예측하는 시스템이다.

4. 매력적인 궤도 (속달성, 편리성, 쾌적성)

4.1 속도 향상

일반의 철도 이용자에게 “매력적인 궤도”라고 하는

개념이 있을 수 있는지는 확실하지 않다. 그러나, 속달성, 편리성, 쾌적성을 실현하기 위해서는 궤도 기술의 향상이 불가결하다. 기본적으로는 속도 향상과 승차감 향상이 열거된다. 고속 철도의 설계 기준으로는 이미 350 km/h가 세계 표준으로 되어 있다. 속도 향상에는 곡선 선형이 제약되는 경우가 많으며, 소음·진동 문제의 해결이 전제로 된다. 기존 선로의 곡선 통과 속도는 차체 경사 차량(진자 차)을 도입하여 해결하는 경우가 있으며, 차체 중심을 낮추어 속도의 향상을 도모하기도 한다.

고속에서 차량의 전달 함수에 관한 정확한 지식의 부족과 온라인 차량 응답 계산에 관한 경험 부족의 점에서 궤도 선형의 파워 스펙트럼 밀도 함수가 시험되어 왔으며 이들로부터 표준 편차의 변동에 대응하는 표준을 가지는 파장대역 구성이 도출되어 왔다.

4.2 승차감 향상

승차감을 논하는 경우에는 먼저 승차감이 무엇인가에 대하여 논의하는 것이 필요하다. 이것에 대하여는 국제표준화기구(ISO)가 적극적으로 활동하고 있으며, 이미 몇 개의 기준을 제시하고 있다.

고속 선로의 승차감 개선은 장파장 궤도 틀림을 정비하는 것이 효과가 크며, 운중 변동이나 전동음 억제를 위한 레일 요철 관리가 중요하다. 장파장 궤도 틀림의 개선은 “간단히 고칠 수 있는” 자갈 궤도에서 현저하다. 앞으로는 경험적으로 알려지고 있는 “좋은 선로는 틀림이 진행되지 않는다”고 하는 사실을 정량적으로 파악하여 가는 것이 승차감 향상뿐만이 아니고 비용 절감으로 이어지는 것도 기대된다. 다만, 승차감은 승차 구간 내에서 상대 평가이며, 여기까지 행하면 좋다고 하는 한계가 없다. 어쩌면 “기분 좋은 흔들림을 고려한 궤도 관리”라고 하는 해결책이 있을지도 모른다.

5. 환경과 조화한 궤도 (환경 친화성)

5.1 소음·진동 방지

차량의 주행 하에서 궤도의 동적 거동에 관한 해명은 궤도 부재의 열화나 궤도 침하 메커니즘의 해명뿐만 아니라 전동음·구조물음·지반 진동 대책의 검토에도 불가결하다.

소음·진동 대책의 면에서 현상을 적확히 분석·평가하여 철도에서 효과적이고 경제적인 방책을 선택하는 것이 중요하다. 소음 발생원의 하나인 차륜 전동음을 저감하기 위하여 레일 요철과 전동음의 관계에 관한 해석이 진행되고 있다. 레일 파상 마모(파장 10~20 cm)는 차량/궤도 각부의 진동이나 소음의 증가를 초래하므로 발생 메커니즘의 해명과 대책의 확립이 필요하다. 레일을 효과적으로 연마하기 위해서는 축상 가속도를 이용한 레일 요철 상태의 측정·평가 체제를 정비하고 연마 방법의 개선을 시도할 필요가 있다.

또한, 소음·진동 저감 효과가 높은 궤도 구조와 레일 체결 장치의 개발이 필요하다.

5.2 환경 보호

철도는 환경에 뛰어난 교통 기관이라고 한다. CO2 총 배출량 중 교통 기관이 점하는 비율은 22%이며, 그 중 자동차가 88%, 해운이 5%, 항공이 4%, 철도가 3%라는 통계도 있다. 철도가 CO2 삭감에 노력한다고 하여도 CO2 총 배출량의 삭감에 대한 기여도는 작다. 그러나, 철도의 편리성 향상이나 비용 저감에 의하여 다른 교통 기관의 시장 점유율이 철도로 옮겨지는 것을 고려하면, 그 효과가 크다.

지구 환경을 배려한 궤도 재료의 선택은 향후의 큰 과제이다. 나무나 석재 등 천연 재료 확보의 어려움이나 리사이클 가능성, 대기 오염, 폐기물 처리 방법 등

여러 가지 조건을 배려하여 재료를 선정할 필요가 있다. 앞으로 철도 관계의 환경 관리 시스템(ISO 14001)을 취득하는 것도 필요할 것이다.

궤도 관계에서도 이전부터 헨 타이어를 재이용한 바ラスト 매트 등의 리사이클 예가 있지만, 주로 비용 면에서만 검토되었다. 최근에는 소각 회(灰)고화(固化) 바ラスト나 리사이클 흡음재 등 환경 보호를 강하게 의식한 기술 전개를 진행하고 있다.

6. 결론

궤도 기술은 철차륜/레일계 철도를 지지하는 철도 고유의 중요한 기술 분야이며, 궤도의 동적 거동이나 차량/궤도의 상호 작용 등 궤도에 관계하는 철도 고유 현상의 해명을 진행하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 재현할 수 있는 기술을 확립하는 것이 필요하다. 요즈음에 전개되고 있는 기술의 보더레스(borderless)화, 글로벌화는 스스로의 노력과 진보가 없는 조직이 간단하게 무너져 사라지는 운명이라는 것을 나타내고 있다. 따라서, 철도의 가치를 높이도록 기반 기술의 향상·충실, 장래를 향한 신기술의 개발이 중요하다.

참고 문헌

- [1] 서사범 : 철도공학의 이해(Railway Engineering), 도서 출판 (주) 열과 알, 2000. 4.
- [2] 서사범 : 선로공학(線路工學) 개정판, 도서 출판 (주) 열과 알, 2002. 2.
- [3] 서사범 : 궤도 장비와 선로 관리(Mechanized Track Maintenance), 도서 출판 (주) 열과 알, 2000. 12.
- [4] 徐士範 : 軌道施工學 개정판, 도서 출판 (주) 열과 알, 2001. 3.
- [5] 서사범 譯 : 최신 철도선로, 도서 출판 (주) 열과 알에서 2003년 3월에 발간 예정.