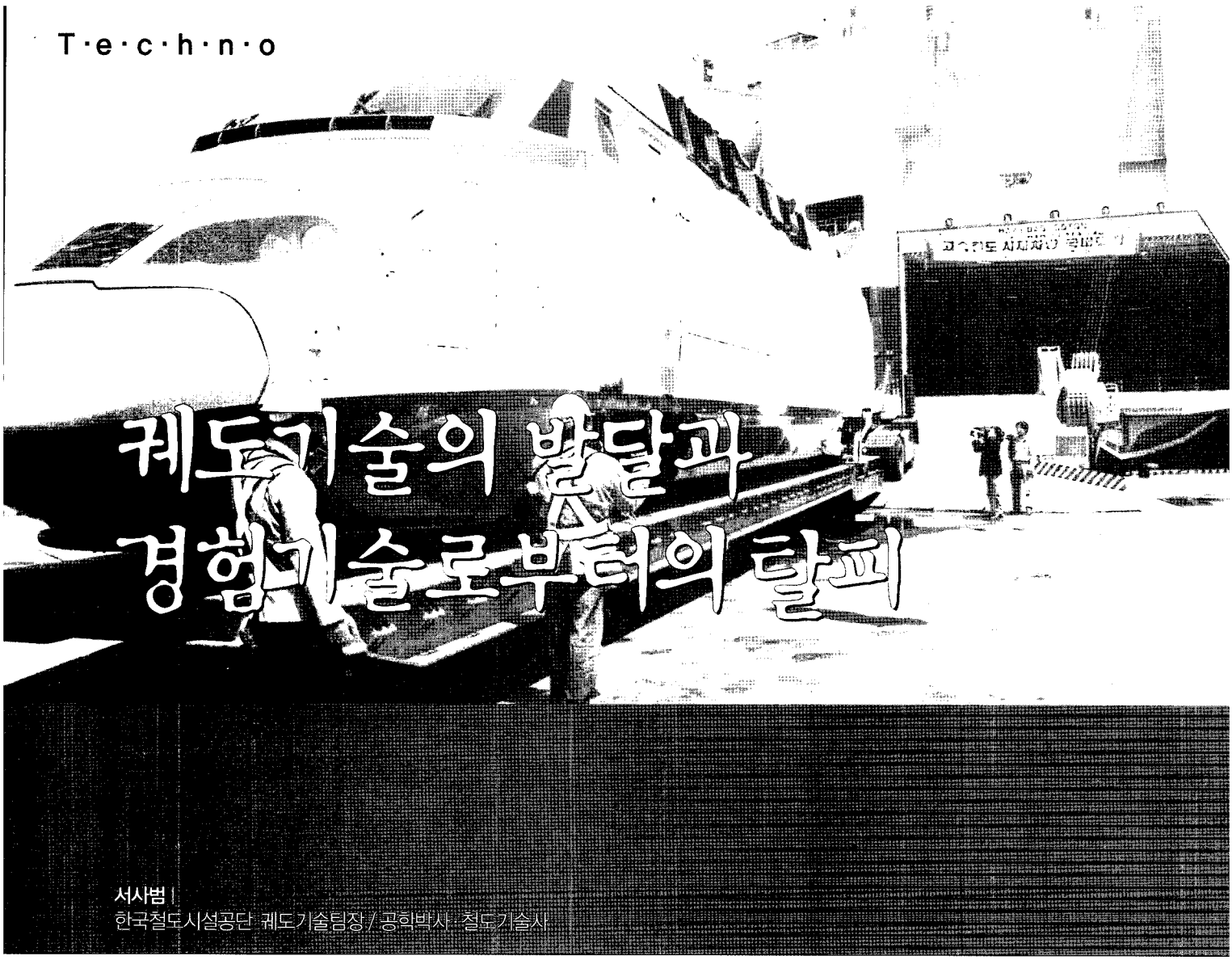


궤도기술의 발달과 경험기술로부터의 탈피

서사범 |
한국철도시설공단 궤도기술팀장 / 공학박사 · 철도기술사

1. 머리말

철도의 선로를 차분하게 본 적이 있는가? 레일, 침목, 도상(깬 자갈)으로 이루어진 부분을 '궤도'라고 하고 있지만 그 구조는 놀랄 만큼 간단하다. 그와 같이 간단한 구조로서 수십 톤이나 되는 철도차량이 100km/h 이상(일반선로), 또는 최고 300km/h(고속선로)로 주행할 수 있도록 지탱한다는 사실은 예술적이기조차 하다. 그러나, 거기에는 철도가 탄생하고부터 약 180년의 역사와 경험이 응축되어 있다. "궤도는 열차가 통과함에 따라 열화가 수반되므로 그것을 보수하는 것을 전제로 하는 구조물이다"라고 하는 말은 궤도기술자로서는 귀에 익은 말이지만, 아직까지도 절대적인 설득력을 갖고 있다. 그러나, 이것에 만족하고 있다는 뜻이 아니고 레일이음매를 용접하여 레일의 길이를 선구의 전구간 또는 50km 이상으로 한 슈퍼 장대레일이나 보수작업을 대폭으로 줄이는 콘크리트궤도를 개발하는 등의 기술개발을 진행하여 왔다.

"궤도기술은 경험기술이다"라고 하는 말은 예전부터 내려온 관용어이다. 많은 연구자와 기술자의 노력에도 불구하고 궤도의 거동에 관하여는 해명되지 않은 부분이 남아있다. 또한, 현장의 궤도보수 담당자는 궤도의 거동이 궤도구조, 운전조건, 장소, 계절 등에 따라 천차만별이며 기왕의 이론과 맞지 않는 일이 수많이 있다고 하는 현실에 직면하고 있다.

더욱이, 숙련된 궤도기술자는 제육감(第六感)이라고 하는 감각을 이용하여 높은 정밀도로 궤도상태의 변화를 예측할 수 있는 경우가 많은 것도 사실이다. 그러나, 지금까지 우연으로서 받아들여 왔던 궤도에 관한 현상의 메커니즘이 근년의 모니터링기술이나 해석기술의 고도화에 따라서 공학적으로 차차 해명되고 있는 중이다. 더욱이, 궤도재료나 궤도상태의 열화에 대한 예측기술이나 궤도보수계획의 최적화 기술을 적용함으로써 궤도보수의 효율화가 도모되고 있다.

본고에서는 궤도기술의 발달과 관련하여 궤도기술의 신기원, 미래의 궤도구조, 궤도기술의 한계 등을 살펴보고, 또한 궤도의 약점인 레일이음매와 분기기를 대상으로 하여 궤도보수의 저감을 목표로 하는 기술개발을 소개하며, 궤도의 유지관리 표준을 정할 때에 궤도에 요구되는 성능과 구체적인 유지관리 기준의 고려방법 등에 대하여 논의한 다음에, 지금까지 자칫하면 안이하게 받아들이고 있던 '경험기술'로부터 탈피하는 것을 목표로 한다고 하는 관점에서 급속하게 변하고 있는 궤도기술의 일단을 소개한다.

2. 궤도기술의 발달

2.1 궤도기술의 신기원

인류가 '차륜'을 발명한 것은 기원전 3000년경까지 거슬러올라가지만, 원활하게 주행하도록 판(板)을 부설하는 등으로 주행로를 확보한 것은 그와 같이 오래되지 않았다. 철도로 생각되는 가장 오래된 그림은 독일 내 교회의 창에 남아 있으며, 1350년경에 그린 것이라고 한다.

철도가 큰 발전을 달성한 것은 다음의 2대 발명의 덕택이라고도 할 수 있다. 하나는 차륜 '플랜지'의 발명이라고 생각되며, 이에 따라 차량이 주행로에서 벗어나지 않고 주행할 수 있게 되었다. 또 하나는 '분기기'의 발명이라고 생각할 수 있다.

이 발명이 없었다면 철도는 같은 선로 위를 왔다 갔다 할 뿐이며, 현재와 같은 철도 네트워크는 구성되지 않았을 것이다. 궤도기술의 분야에서도 옛사람들의 성과가 수많이 있지만 그 중에서 신기원이라고 생각되는 것의 일부를 〈표 1〉에 열거한다.

〈표 1〉 신기원의 궤도기술 예

기술항목	실용화 년도
평저(平底)레일	1850년
장대레일	1953년
PC침목	1954년
콘크리트 궤도	1972년

(1) 평저레일

레일형상의 변천은 흥미가 깊다고 할 수 있다. 침목마다 교량을 가설한 것처럼 짧은 레일이 걸쳐있던 극히 초기의 단계는 별도로 하고, 먼저 '쌍두(雙頭)레일'이 사용되었다. 이것은 귀중품인 레일을 상면과 하면으로 2회 사용한다고 하는 아이디어로 개발되었다. 그러나, 실제로는 뒤집어서 사용하려고 하니까 하면이 진동으로 인하여 이미 마멸되어있기도 하고 부식되어있기도 하였으므로 널리 사용되지는 않았다. 그러므로, 하면을 사용하는 것은 단념하였지만, 쌍두레일용의 체결장치인 체어(chair)를 그대로 사용하고 차륜과 접촉하는 부분의 마모 몫을 크게 취한 것이 '우두(牛頭)레일'이다. 그 후에 등장한 것이 현재에도 사용되고 있는 평저(平底)레일이며, 1983년 미국의 스티븐스가 최초로 설계하였다. 이 레일은 체어를 사용하지 않고 체결이 간단하며 안정성이 좋은 등의 장점 때문에 부동의 지위를 얻고 있다.

(2) PC침목

침목(枕木)이라고 하는 명칭이 나타내고 있는 것처럼 침목의 재료로서는 목재가 일반적이었다. 그러나, 목재는 부후(腐朽)를 피할 수 없으므로 일찍부터 공업제품인 철이나 콘크리트를 사용하는 시도가 있었다. 휨이나 충격에 약하다고 하는 콘크리트의 약점이 침목에서 극복된 것은 프리스트레스트 콘크리트를 채용하였고, 레일패드를 이용한 탄성체결장치를 개발하였기 때문이었다.

(3) 장대레일

궤도의 약점인 레일이음매를 없앤다고 하는 꿈을 실현한 것이 장대레일이다. 이 기술을 이용함에 따라 소음·진동이 감소되고 레일이음매에 기인하는 손상이 없게 되어 궤도 보수량이 격감하였다. 한편, 궤도구조의 강화, 레일 복진의 관리, 신축이음매의 관리, 레일의 재설정 등과 같은 작업이 더해지는 것으로 되었다.

장대레일에 관하여 잊어서는 안 되는 것은 용접기술이다. 현재 플래시 벗 압접, 가스 압접, 테르밋 용접, 엔크로즈 아크 용접 등의 4 종류가 사용되고 있다. 용접기술은 장대레일의 보급과 표리일체이며, 언제라도, 어디라도 간단하게 용접할 수 있는 '보통 기술' 이어야 한다.

(4) 콘크리트 궤도

독일은 유럽에서 생력화 궤도의 연구 개발에 가장 열심이며, Eisenmamm이 설계한 콘크리트 침목을 흙 노반 상의 콘크리트 슬래브에 매설하는 형식의 슬래브 궤도를 1972년에 Rheda 역구내에 부설하였다. 또한, 이 Rheda형을 Fulda~Wurzburg간의 터널에 시험 부설하고, Hanover~Fulda간의 터널 안에 약 10km에 사용하였다. 1977년부터 새로운 6 유형의 시험 궤도를 Ingolstadt~Manheim간에 부설하였으며, 이 중에서 c형은 Rheda역구내에 설치된 것과 같은 형이다. 1986년에는 Stuttgart-Manheim과 Wurzburg-Hannover의 ICE 노선의 터널 구간에 각 1개소씩 Rheda 시스템(궤도 연장 4,000m)을 부설하였다. 시험조건 하에서 406km/h의 최고 기록 속도를 달성한 Wurzburg-Hannover 노선의 영업속도는 280km/h이며, 이 궤도를 포함한 ICE 노선에 걸쳐 330km/h의 시험 운행을 달성하였다. 그 후에도 계속하여 개량된 구조를 부설하였으며, 현재의 Rheda-2000 시스템에 이르고 있다.

일본에서는 1965년에 '신궤도구조연구회' 가 새로운 생력화 궤도의 연구를 시작하여, 궤도 슬래브와 노반 사이에 조절매트 또는 전충재를 넣어 지지하는 '슬래브 궤도' 를 제안하였다. 그 후 山陽 신칸센에서 시험 부설하여 표준구조로 정하고 1975년 개업한 岡山~博多간에 약543km(이것은 당해 구간 연장의 약 68%이다)를 부설하였으며, 東北·山越 신칸센은 8~9할을 슬래브 궤도로 부설하였다.

2.2 미래의 궤도구조

철도의 기원이래 180년 동안 궤도구조는 2줄의 레일을 등(等)간격으로 침목에 체결한 궤광을 자갈도상으로 고정한다고 하는 기본 개념이 변하지 않고 있다. 그러므로, "궤도기술자는 무엇을 하고 있었는가?" 라고 하는 질문을 받기도 하지만, 일단 그것에 대한 답으로 다음과 같이 말할 수 있다. 즉, 궤도구조는 차량하중을 지지하고 안내한다고 하는 기능을 2줄의 레일이라고 하는 최저한의 부재구성으로 실현하고 있는 훌륭한 구조이다. 또한, 건설비용, 배선변경, 구조물의 변상에 대한 추종성 등, 종합적으로 고려하면 이보다 좋은 구조가 없었다고 하는 점이다.

근년에는 열차속도의 향상, 보수시간의 감소, 보수작업시의 소음·진동 방지, 궤도보수비의 증가 등, 철도를 둘러싼 환경의 변화가 있으므로 이에 대응하기 위하여 자갈도상을 이용하지 않는 각종의 직결(直結)궤도가 나타나고 있다. 또한, 장래지향 과제로서 혁신적인 궤도구조로의 도전이 진행되고 있다. 궤도구조는 이미 충분히 궂은살을 도려낸 심플한 것이므로 몰두하여야 할 방향은 그다지 남아있지 않다. 즉, 고려되는 것은 체결리스(締結less), 도상자갈리스, 검사리스 등의 방법이다. 본고에서는 이들을 '3리스(less) 궤도' 라고 부르기로 한다.

(1) 체결리스

유럽의 각 국에서는 10수 년 전부터 노면전차를 다시 보기 시작하여 재래 노선의 궤도 갱신이나 신선의 건설이 왕성하게 진행되고 있다. 그 때에 레일을 고정하는 방법으로 레일 체결장치를 이용하지 않는 '매립 궤도' 를 채용하는 예가 나타나고 있다. 노면전차는 하중이 작고, 속도가 느리며, 또한 만에 하나 탈선하더라도 피해가 적다고 하는 특성 때문에 지금까지 없던 획기적인 궤도구조를 채용하기 쉬운 환경에 있다고 추정된다. 통상의 철도와 달리, 곡선통과는 안쪽 차륜의 안쪽에서 안내되므로 바깥쪽 레일의 마모가 적은 점도 매립레일의 채용을 용이하게 하고 있다.

이 매립레일은 노면전차뿐만이 아니고 중·고속열차용 궤도에도 적용하려는 시도가 진행되고 있다. 이 종류의 구조라면 "레일마모나 레일손상 시에 레일을 어떻게 교환하는 것일까?" 라고 하는 생각이 들 것이다. 그러나, 직선 또는 완만한 곡선으로 한정하면 레일마모는 그만큼 크지 않고 연간 통과 톤수를 고려하면 교환주기가 극히 길게 되는 사용 장면도 많으며 채용의 가능성이 충분히 있다.

(2) 도상자갈리스

직결궤도, 콘크리트궤도, 슬래브궤도, 채용이 오래된 교

량 위의 궤도구조와 같이 도상자갈이 없는 궤도구조는 희귀한 것이 아니다. 도상자갈로부터 결별하면, 동시에 지지구조의 변위에 추종하기 위한 레일위치 조정량이 구해지게 되어 체결장치의 복잡화가 시작된다. 상기의 '체결리스'를 실현하기 위해서는 이 조정량이 필요하다고 하는 전제에서 떠나는 것이 필요하게 된다. 직결궤도에서의 궤도 틀림진행은 특수한 경우를 제외하고 매우 적다. 근년에는 궤도부설 시부터 장파장 궤도정비를 시행하여 극히 좋은 궤도상태를 실현하고 있다. 이러한 상황에서 보면 만일을 위한 조절량 확보를 포기하고 완전 직결궤도를 채용한다고 하는 선택이 있는 것은 아닐까? 그 결단이 체결리스 궤도구조를 실현함에 있어 가장 높은 장애물일지도 모른다.

(3) 검사리스

여기서 말하는 검사리스는 전혀 검사하지 않는 것을 의미하는 것이 아니다. 검사가 필요하지 않도록 하기 위해서는 구조상 충분한 여유를 갖는 것이 필요하지만, 궤도구조는 자신의 강도에 비하여 상대적으로 극히 큰 열차하중을 지지하고 있으므로 구조강화를 이용하여 검사리스로 하는 것은 곤란할 것이다.

여기서 말하는 검사리스는 "시간이 걸리는 검사를 요하지 않게 한다"고 하는 것이다. 당면은 검사의 자유화를 진행하는 것으로 되지만, 궁극적으로는 부재가 자체적으로 나쁜 곳을 신고하게 되는 궤도구조를 목표로 하는 것이다. 급속하게 진행되고 있는 센서기술이나 IT기술이 이것을 실현하는 후원자로 되고 있다.

현재에도 기능을 수행하고 있는 자기진단 기능으로는 예를 들어 레일파단 검지가 있다. 레일이 파단되면 신호가 적색으로 되어 열차가 멈춘다고 하는 시스템은 상당히 좋게 이루어져 있다. 레일본드 보수 등의 시간은 늘어나지만 이 시스템이 가져오는 안심감(安心感)은 절대적이다.

2.3 궤도기술의 한계

철도에서 열차가 주행하기도 하고 멈추기도 하는 것은 차륜과 레일간에 마찰이 있기 때문이다. 그러나, 탈선하는 것도 또한 마찰이 있기 때문이다. 주행안전성 평가의 기본인 탈선계수의 계산에서는 '마찰계수가 0.3'이라고 딱 잘라서 사용하는 경우도 많지만 올라 탐 탈선이 일어나는가 일어나지 않는가를 검토하는 경우에는 마찰계수가 극히 중요한 수치임에도 불구하고 현장에서 실제의 값을 정확하게 추정하는 수단이 없다. 그 외에도 쉐링은 왜 일어나는 것일까? 파상 마모의 발생 메커니즘은? 레일마모는 제어할 수 없는 것인가? 자갈궤도의 침하 메커니즘은? 등등 충분히 해명되지 않은 것이 많다.

정확하게 지금까지의 경험, 시험결과, 해석결과 등의 축적에 따라서 많은 현상의 추이를 예측할 수 있도록 되어 왔다. 또한, 확률적으로는 여러 가지의 것을 정량화할 수 있도록 되어 왔다. 예측 정밀도가 충분히 높다면, 메커니즘이 명확하지 않아도 실용상의 문제가 없다는 뜻이지만 그와 같은 기술은 인식되어 있지 않은 전제조건을 간과하고 있을 가능성이 있기도 하고 경우에 따라서는 생각지도 않은 함정에 빠지는 일이 있다는 점을 잊어서는 안 된다.

3. 궤도약점 보강방책의 검토

3.1 궤도의 약점

궤도는 크게 ①일반부, ②레일이음매부, ③분기기부로 나눌 수가 있다. 이음매 궤도에서 궤도정비 개소의 비율은 예를 들어 이음매개소가 대략적으로 전체의 44 %를 점하고 있으며, 그 외에 교량 전후 11 %, 건널목 전후 7 %, 분기기 5 %, 기타 일반부 33 %로 되어 있다. 또한, 분기기는 구조가 복잡하고 검사항목도 많기 때문에 보수의 품이 들어가고 있다. 즉, 연장이 압도적으로 많은 부분을 차지하는 것은 일반부이지만 궤도보수에서 품이 가장 많이 드는 것은 이음매부와 분기기부이다. 이 이음매부와 분기기부에 착안하여 장래 지향적으로 강도평가와 보수저감대책을 강구할 필요가 있으며, 이에 대한 목적은 다음과 같이 고려할 수 있다.

① 레일이음매부의 동적 해석모델을 구축하여 레일손상의 방지나 궤도틀림 진행의 억제라는 견지에서 비용저감의 효과가 높은 개량대책을 찾아낸다.

② 분기기 각부의 구조해석 모델을 구축하여 동적 하중의 억제와 구조강화에 따른 주행안전성의 향상과 비용의 저감에 관하여 검토한다.

3.2 레일이음매부의 강화방책

레일의 길이는 25m가 표준이다. 레일간의 연결은 양쪽 레일 끝 부분에다 이음매판을 대어 볼트로 단단하게 조인 것이지만, 이음매부의 종방향 휨 강성은 일반부 레일의 약 1/3 밖에 되지 않으므로 차륜이 이음매부분을 타면, 레일 끝 부분이 처져서 차륜과 레일이 충돌하게 되고 이에 따라 큰 충격력이 작용하게 된다. 이와 같은 충격이 반복되면 하중이 없을 때에도 처져 있는 '이음매 처짐' 이라고 하는 상태로 된다. 레일이음매부에는 다음과 같은 문제점이 있다.

(1) 레일 배터(batter)

레일 배터는 차륜이 레일 끝 부위를 때려서 생기는 레일의 소성변형이다. 이것은 차륜충격의 원인으로 되며 이음매 처짐을 조장한다. 이에 대하여는 용사(溶射) 육성용접(변형부위를 용접금속으로 돋우는 방법)이라 하는 특수한 보수방법도 있지만 보통은 변형된 레일 끝 부분을 잘라내고 다른 선구에서 다시 사용한다.

(2) 레일 파단

이음매판이 단단하게 조여있지 않으면 레일 끝 부분에 큰 휨 하중이 반복하여 걸리고 레일구멍 주변에서 균열이 진전되어 레일 끝 부분이 부러지는 일이 있다. 이 현상은 주행안전성에 중대한 영향이 있으므로 미연에 방지하는 것이 중요하다.

(3) 이음매판 · 이음매볼트의 절손

열차통과 시에는 이음매판과 이음매볼트에도 충격적인 큰 응력이 발생된다. 또한, 레일이음매에는 레일의 온도신축을 흡수한다고 하는 큰 역할이 있지만 레일유간(레일이음매의 틈)의 관리가 충분하지 않으면, 레일 길이방향의 온도하중을 받아 볼트가 절손되기도 하고 레일이 좌굴되기도 하는 일이 있다.

(4) 뜬 침목

열차하중으로 인한 도상자갈의 침하가 크게 되면, 하중이 실리지 않는 경우에는 침목이 레일에 매달리게 되는 '뜬 침목' 이라고 하는 상태로 되어 도상이나 노반에 대한 충격적인 하중 증대의 원인으로 된다. 또한, 하중이 실려있지 않은 때는 레일표면의 요철이 그만큼 크게 보이지 않으므로 궤도보수상의 맹점으로 되는 경향이 있다.

(5) 분니(噴泥)

열차하중이 크고, 노반이 점성토이며, 노반의 배수가 나쁘다는 등의 조건이 무거워져 흙탕물(泥水)이 솟아오르는 현상을 '분니' 라고 한다. 맑은 날에는 이음매부의 주변이 건조한 흙탕으로 하얗게 되므로 곧바로 알 수 있다. 분니 개소는 대부분이 뜬 침목 상태로 된다. 발생빈도가 적다고는 하지만 고가교나 터널 등의 콘크리트 노반에서도 깬 자갈이 문질러져 마모되고 그 가루가 흙탕물이 되어 분니에 이르는 경우도 있다.

이들의 문제에 대하여 레일이음매부 해석모델을 이용하여 이음매부 주변의 응력을 해석한 결과, 레일저부 휨 응력은 이음매 앞쪽 약 100mm 위치에서 최대치(약 40N/mm^2)가 생기며, 이 레일저부 휨 응력의 계산치는 실측치와 비교하여 대체적으로 최대 30%의 오차로 추정할 수가 있었다.

레일이음매부의 침하를 억제하기 위한 고려방법과 구체적 방책은 예를 들어 〈표 2〉와 같이 정리할 수 있다. 충격완화와 탄성부가를 목표로 한 공법의 예로는 침목 아래의 틈을 충전하는 공법이 있으며, 이 공법은 2종류가 있다. 하나는 침목 아래의 자루에 수지를 전충하는 공법이며, 또 하나는 시멘트 아스팔트 그라우트(CAG)를 직접 전충하는 공법이다. 영업선로에서 시험 부설한 예를 보면, 양 공법이 모두 소정의 레일이음매부 침하억제 효과를 나타내고 있다.

한편, 중 · 하급 선로용의 저(低)비용 레일 용사방법으로서 레일 상부만을 용접하여 이음매판으로 보강하는 방법을 검토하는 예도 있다. 용접개소의 하단은 응력 집중에 기인하는 피로균열의 발생을 피하기 위하여 드릴로 구멍을 열 필요가 있다. 레일 종 휨 강성의 증가는 기대할 수 없지만 이음매 충격은 현저하게 완화된다. 이 방법에서는 용접시간(엔크로즈 용접 8분, 두부 다층 용접 8분, 부대작업 4분, 합계 20분)이 통상 방법(저부 다층 용접 20분, 엔크로즈 용접 15분, 두부 다층 용접 15분, 부대작업 10분, 합계 60분)의 1/3로 되는 점에서 선구의 상황에 따라서는 유효한 방법으로 된다. 다만, 레일을 장대화하기 위해서는 다른 요소도 필요하므로 활용법으로서는 50m 레일화에 따른 레일이음매부의 반감 등이 고려된다.

〈표 2〉 레일이음매부 침하 억제의 고려방법과 방책의 예

고려방법	구체적 방책의 예
충격 완화	레일 삭정, 용사 육성, 중고(中高)이음매, 스톤 블로어
강성 부가	종침목, 큰 이음매 침목, 이음매 보(beam) 부가
탄성 부가	저탄성 패드, 탄성 침목, 탄성 도상자갈
도상 강화	도상 강화처리, 도상에 수지 살포

3.3 분기기부의 강화방책

분기기는 철도 최대의 발명이라고도 말해지며 눈에 비치는 모습에 따라서는 간단한 구조로 거대한 철도차량을 고속으로 소정의 진로로 나누는 역할을 수행한다. 이와 같이 중요한 설비이지만, 텅레일이나 크로싱은 단면변화가 복잡하여 해석이 곤란하였던 점 때문에 그 설계는 경험에 크게 의존하여 왔다.

미래지향 테마로서는 각종 차륜 답면형상을 고려한 "텅레일에 대한 응력의 해석과 형상의 최적화" 및 차륜배면 횡압에 대한 가드레일 · 윙 레일 부분의 "충격 · 올라탐에 대한 강도 · 안전성의 평가"를 고려할 수 있다.

텅레일에 발생하는 응력의 해석에는 텅레일과 기본레일의 유한요소 해석모델을 이용한다. 50N 편개 10번 분기기의 경우에 차륜이 선단 접근부위부터 갈아타는 범위의 크기는 원호 답면, 기본 답면, 수정원호 답면, N 답면의 순으로 된다.

분기기의 크로싱부에는 차륜의 이선 진입을 방지하는 가드레일이 설치되어 있지만, 차륜이 가드레일에 충돌할 때에 차륜 안쪽으로 작용하는 힘('차륜배면 횡압'이라 한다)이 크면 차륜이 가드레일로 올라타는 현상이 일어나는 것이 상정된다. 차륜배면이 가드레일로 올라타는 경우의 탈선계수(횡압과 윤하중의 비)는 차륜 플랜지가 일반의 레일에 올라타는 경우의 약 1.6배로 된다. 이 결과는 가드레일의 형상과 강도의 검토에 반영할 수 있다.

4. 궤도 유지관리 표준의 검토

4.1 궤도에 요구되는 성능

잘 알려진 것처럼 궤도에 요구되는 성능으로서 가장 중요한 것은 '안전성'이며, 다음으로 중요한 성능은 대량고속 수송기관으로서 필요한 '정시성의 확보'이다. '승차감'은 기본적으로는 철도운영자가 제공하는 서비스의 문제이지만 적어도 승객이 불안하게 되거나 차량이 과도하게 진동하는 것은 피하여야 한다. 이러한 의미에서 '과도한 차량진동의 방지'는 궤도에 요구되는 성능의 하나이다.

이들의 성능, 예를 들어 올라탐 탈선에 대한 안전성을 직접 평가하기 위해서는 차상에서 윤하중과 횡압을 측정할 필요가 있다. 최신의 궤도 검측차 중에는 윤하중과 횡압의 측정이 가능한 것도 있지만, 윤하중 · 횡압의 측정은 일반적으로 새로운 형식의 차량을 투입할 때나 속도를 향상시킬 때라고 하는 특수한 기회밖에 시행하지 않는다. 이 때문에 궤도를 유지 관리할 때는 궤도 변위나 열차동요와 같이 측정이 비교적 용이한 항목을 이용하여 탈선에 대한 안전성을 간접적으로 담보하고 있다.

이와 같은 관점에서 궤도의 유지관리에 관한 표준을 검토하기 위해서는

① 어떤 성능의 실현을 목표로 하는가? (성능항목)
② 그를 위하여 궤도 측에서 구체적으로 무엇을 검토하는가? (평가지표)
③ 검사결과를 어떻게 판정하는가? (기준치)
④ 판정한 결과, 성능이 충족되지 않을 경우에는 어떻게 하는가? (조치)

의 4점을 고려할 필요가 있다. 상기의 탈선에 대한 안전성의 경우에 성능항목은 '탈선에 대한 안전성', 평가지표는 '궤도변위', 기준치는 예를 들어 '고저 변위 0 mm', 조치는 '신속한 보수의 투입'으로 된다.

궤도에 요구되는 성능과 이것에 대응하는 평가지표의 조합 예를 〈표 3〉에 나타낸다. 유지관리의 표준에서는 궤도에 요구되는 일반적인 성능에 응하여 〈표 3〉의 우측 난에 나타낸 평가지표와 그 기준치의 표준적인 산출방법이 필요하다. 실시기준을 정할 때는 이 유지관리 표준을 참고로 하여 당해 철도의 실상에 맞추어 평가지표와 기준치를 정하면 좋다. 또한, 예를 들어 궤도 변위의 기준치는 차량의 성능에 따라 변하므로 차량의 제원을 고려하여 기준치를 정할 필요가 있다.

궤도는 일반의 토목구조물과 비교하여 수치적인 평가지표를 이용하는 검사 · 평가가 비교적 진보되어 있다. 예를 들

면, 궤도 변위, 레일 마모, 이음매 유간 등은 1 mm 단위로 검사 · 평가하고 있다.

이들의 검사항목이나 그 기준치의 대부분은 공학적인 근거가 명확하게 되어 있지만 긴 역사 중에서 철도사업자가 독자적이고 경험적으로 정한 것도 있다. 이 때문에 유지보수 표준을 검토할 때는 궤도보수의 실태와 괴리되는 일이 없도록 하여야 한다.

이 장에서는 궤도보수 실태, 기술기준의 동향이나 궤도에 요구되는 성능 등에 기초하여 궤도 유지관리의 표준을 검토할 때에 고려하여야 하는 사항에 대하여 논의한다.

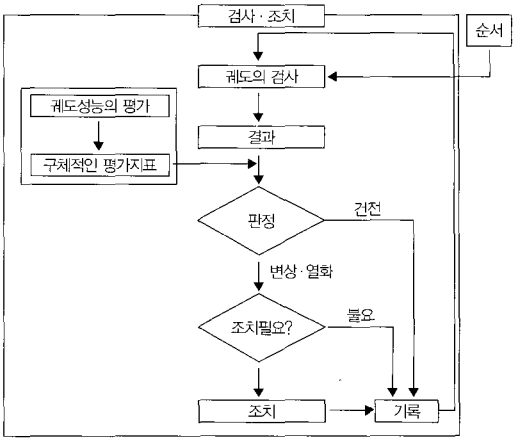
4.2 유지관리의 구체적인 흐름

철도궤도가 일반의 토목구조물과 다른 점으로서 상기에서도 언급하였지만 궤도는 열차의 통과에 수반하여 서서히 틀림이 진행되는 것을 전제로 하는 구조물이라고 하는 점이다. 틀림이 진행된다고 하여도 지진의 피해를 받은 토목구조물과 같이 사용불능까지 파괴되어버린다는 의미가 아니고 궤도 변위가 서서히 크게 변형되어가기도 하고 레일의 마모가 조금씩 크게 된다고 하는 의미이다. 궤도의 유지관리를 고려할 때는 이와 같은 궤도의 특성을 충분히 인식하여 둘 필요가 있다.

궤도 유지관리의 표준적인 흐름을 〈그림 1〉에 나타낸다. 이 그림에서 중앙에 나타낸 후로는 유지관리를 위한 검사 · 판정 · 조치라고 하는 구체적인 순서로 된다.

또한, 좌측의 2중선 틀 안에 있는 성능항목과 평가지표는 표 3에 소개한대로 이다. 이들은 매 회의 검사에서 그 때마다 정하는 성질의 것이 아니고 유지관리의 표준에 기초하여 철도사업자가 실상에 따라서 미리 정해둔 것이다. 또한, 우측에 '순시'를 구별하여 나타내고 있지만, 궤도 변위나 궤도재료 상태의 '검사'와 선로전반의 상황을 확인하는 '순시'는 구별하여 다루고 있다.

더욱이, 〈그림 1〉은 일상업무에서 다루는 정기적인 검사 · 보수의 표준적인 흐름을 나타낸 것이다. 태풍이나 장마 등과 같은 자연재해의 직후에 시행하는 검사나 보수 방법에 대하여는 별도로 정하고 있다.



〈그림 1〉 궤도 유지관리의 표준적인 흐름

4.3 순시

'순시'란 지금까지 많은 철도사업자가 '순회검사'와 거의 같은 의미로 다루어 왔었다. 그러나, 새로운 체계에서는 육안확인인 '순시'와 '순회검사'를 구별하여 다루는 것이 좋다. 양자를 엄밀하게 구별하기는 곤란하지만 예를 들어 도보순회 시에 체결장치나 이음매볼트의 체결상태를 스패너나 토크렌치로 확인하는 것은 '순회검사'의 일부이다. 한편, '순시'는 선로전체를 확인하는 것이며, 순시한 결과 이상이 발견된 경우에는 다시 '검사'를 한다. 〈그림 1〉에서 '순시'에서 시작한 후로가 검사에 연결되어 있는 것은 이 때문이다.

순시의 필요빈도는 선구가 놓여진 상황에 따라 여러 가지이다. 예를 들어, 고온다습하고 선로의 주위에서 수목의 생육이 빠른 지역에서는 꼼꼼하게 순시하여 건축한계를 침범하는 나뭇가지 등이 발견된 경우는 신속하게 벌채할 필요가 있다. 역으로, 도심에서 고가교 위의 생력화 궤도 구간 등에서는 지진 등의 큰 자연재해를 받지 않는 한 시간 경과에 따른 궤도상태의 변화가 극히 작다고 생각되므로 순시의 빈도를 줄일 수가 있다. 한편, 순회의 빈도는 열차밀도와 어느 정도의 상관이 있지만 구체적인 횟수나 방법을 공학적으로 정하기는 어려우므로 지금까지의 경험에 기초하여 정하는 것이 합리적이다. 다른 한편, 대부분의 철도에서는 도보순회와 열차순회를 병용하고 있다.

4.4 궤도 변위와 열차동요의 관리

(1) 검측 대상

궤도 변위는 일반적으로 고저(면), 방향(줄), 수준(수평), 평면성, 궤간의 5 항목을 측정한다. 그러나, '주행 안전성의 확보' 라고 하는 성능의 관점에서는 반드시 이 5 항목을 모두 측정할 필요는 없다. 예를 들어, 임해철도와 같이 궤도의 대부분이 화물야드인 철도에서는 운전속도가 제한되기 때문에 저속 시의 탈선에 직결되는 평면성과 궤간을 측정하여두면 안전성이 확보된다. 열차의 동요와 상관이 높은 고저 변위나 방향의 변위는 열차동요의 측정으로 궤도 변위의 측정을 대체하는 것도 가능하다.

고저 변위, 방향 변위는 일반적으로 10m 현 중앙 종거법으로 측정한다. 소수이지만 관성 측정법이라고 하는 가속도의 2회 적분으로 궤도 변위를 산출하고 있는 예도 있다. 측정의 원리가 다르면, 얻어진 데이터에 대한 평가도 변경되므로 유지관리 표준에서는 궤도 변위의 측정항목과 측정원리를 명확하게 하는 것이 좋다.

(2) 검측 방법

궤도 변위는 궤도 검측차로 측정하는 것이 가장 효율적이고 정확하다. 궤도 검측차와 수(手)검측에는 다음과 같은 차이가 있다. 더욱이, 궤도 검측기는 양자의 중간에 있다.

- 궤도 검측차는 차량의 중량을 재하한 상태에서 측정하는 것이 가능하다.
- 일반적으로, 궤도 검측차의 쪽이 측정간격(샘플링 간격)을 짧게 할 수 있다.
- 일반적으로, 궤도 검측차의 쪽이 측정 정밀도가 높다.
- 1회당의 측정에 필요한 노력은 궤도 검측차의 쪽이 적다.
- 궤도 검측차는 도입 시의 초기 비용이나 유지비용이 필요하다.

비용을 고려하지 않는다면 궤도 검측차를 이용하는 검측이 바람직하다. 궤도 검측차를 이용하지 않아도 궤도에 요구되는 성능을 유지할 수 있도록 유지관리 체제를 구성할 필요가 있는 경우도 있으며, 예를 들어 수검측의 경우는 궤도의 약점인 이음매 등을 중점적으로 검측한다.

(3) 검측 주기

궤도 변위의 검측 주기를 검토할 때는 다음의 사항을 고려할 필요가 있다.

- 다음 검측까지의 궤도 변위가 안전상의 한도치를 넘을 확률이 0에 가까울 것.
- 다음 검측까지의 궤도 변위가 정비 기준치를 넘을 확률이 일정치 이하일 것.
- 선구의 상황을 근거로 하여 궤도의 전반적인 상태를 항상 파악할 수 있을 것.

이 중에서 세 번째는 통과 톤수가 아무리 작다고 하여도 검측 주기를 너무 길게 하는 것은 좋지 않다고 하는 의미이다. 예를 들어, 단순하게 고려하면 통과 톤수 200만 톤의 지방선로와 2,000만 톤의 간선에서는 검측 주기가 10배 다르더라도 좋은 것이지만 궤도의 상태가 항상 가뭄이나 강설이라고 하는 기후 · 기상의 영향을 받는 점을 고려하면 여전히 1년에 1회는 궤도 변위를 검측하여 궤도상태를 파악하는 것이 필요하다.

첫 번째와 두 번째를 고려하여 검측 주기를 정할 때는 궤도구조와 통과 톤수에 응한 일정 기간의 궤도 변위 진행을 토대(base)로 하는 것이 합리적이다.

(4) 검측 결과의 평가

궤도 변위의 검측 결과는 통상적으로 그 진폭으로 평가한다. 일반선로에서는 10m 현 중앙 종거, 고속철도에서는 이

〈표 3〉 궤도의 성능항목과 평가지표의 예

성능항목의 예	평가지표의 예
차량이 다른 차량이나 구조물 등에 충돌하지 않고 주행할 수 있다	건축한계, 궤도중심간격 등
차량이 탈선하지 않고 주행할 수 있다	궤도 변위, 열차동요 등
레일이 부러지지 않는다	레일 마모량, 쉐링 손상 등
분기기를 스므스하게 주행할 수 있다	백 게이지, 텅레일 밀착 등
레일의 온도신축에 대응할 수 있다	이음매 유간, 이음매판 볼트 체결토크, 레일 온도, 장대레일 신축량 등
신호제어에 나쁜 영향을 미치지 않는다	텅레일의 접착, 신축이음매의 절연저항 등
차량의 진동이 과도하게 발생하지 않는다	궤도 변위, 열차동요 등

외에 30m 현 장파장 중앙 종거를 병용한다. 또한, 화물열차 주행선구에서는 방향(줄) 변위와 수준(수평) 변위에서 산출되는 복합 변위를 평가지표로 하는 일도 있다. 어떠한 평가지표를 이용하는가는 궤도에 요구되는 성능에 기초하여 철도사업자가 정한다.

평가지표를 결정하였다면, 다음에는 정비 기준치를 정한다. 정비 기준치란 보수를 시행하는 '시작'으로 되는 값이다. 통상적으로는 궤도 변위가 정비 기준치를 초과하지 않도록 관리하지만 기준치를 초과한 궤도 변위가 발견된 경우의 조치도 미리 결정하여둔다.

정비 기준치는 궤도 검측주기와 궤도 변위진행의 속도를 기초로 하여 궤도 변위가 안전상의 한도치에 도달할 확률이 0에 가깝게 되도록 정한다. 예를 들어, 안전상의 한도치와 정비 기준치의 관계를 개념적으로 나타내면 〈그림 2〉와 같이 된다. 대부분의 철도에서는 정비 기준치와는 별도로 정비 목표치를 설정하여 궤도 변위가 정비 기준치에 도달할 확률을 작게 하고 있다.

〈그림 2〉의 우측에 있는 궤도 변위에 대한 안전상의 한도치는 현재의 기술을 이용하여도 정확하게 정하는 것은 곤란하다. 주행 안전성에는 궤도 변위만이 아니고 차량의 보수상태도 크게 관계하기도 하고 직선인가 곡선인가에 따라서도 한도치가 변화한다. 이 때문에 안전상의 한도치로서는 여러 가지 외적 요인을 고려하면서 약간 엄한 값을 이용할 필요가 있다.

(5) 검측 후의 조치

검측 결과, 궤도 변위가 기준치 내에 있으면 문제가 없다. 기준치를 넘는 궤도 변위가 발견된 경우에는 아래의 어느 쪽이든지 조치를 고려한다.

- 열차의 속도를 제한한다 (서행).
- 일정 기간 내에 보수한다 (긴급 정비).

어느 쪽의 조치를 시행하는가는 철도사업자가 선구의 실상에 따라서 판단하게 되지만, 어느 쪽의 경우도 소정의 궤도 성능을 유지할 수 있는 것이 전제조건으로 된다.

4.5 궤도재료의 유지관리

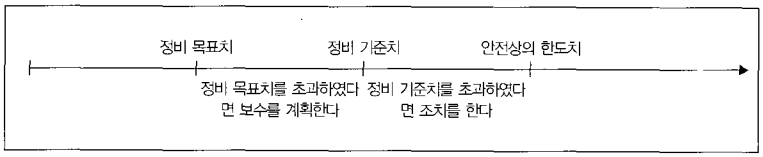
궤도재료의 유지관리에 대하여도 그 기본적인 고려방법이나 유지관리의 흐름은 궤도 변위의 경우와 마찬가지이다. 다만, 궤도재료는 대단히 다기에 걸쳐있고 철도에 따라서 유지관리의 방법도 여러 가지이다.

궤도재료의 유지관리에서는 궤도재료를 크게 두 가지 그룹으로 나눌 수가 있다. 하나는 레일, 분기기 등이며, 이들의 재료가 크게 손상을 입으면 열차의 운행 자체를 할 수 없게 된다. 이들을 1중(重) 계열의 부재라고 부르기도 한다. 또 하나는 레일 체결장치나 침목과 같이 다소의 손상이 있어도 열차의 운행에는 거의 지장이 없는 재료이다. 이들을 다중(多重) 계열의 부재라고 부른다. 궤도에 요구되는 성능을 만족하고 경제성을 높이기 위해서는 1중 계열의 부재와 다중 계열의 부재에 대하여 유지관리 방법을 달리하는 쪽이 합리적이다.

1중 계열의 부재는 열차의 안전·안정 운행을 위하여 높은 신뢰성이 요구된다. 그를 위하여 이들의 부재는 적극적으로 객관적인 검사·판정을 하여 필요에 따라 무엇인가의 조치를 하여야 한다.

예로서 레일의 검사에 대하여 고려하여 보자. 레일의 마모는 궤도 변위와 마찬가지로 열차의 주행에 따라서 서서히 진행한다. 그리고, 마모가 어느 일정량을 넘으면 레일의 강도가 저하하기도 하고 건축한계 하부한계를 지장하기도 한다. 또한, 분기기를 구성하는 레일의 마모는 탈선의 원인으로 된다. 레일이 충족시켜야 하는 성능은 여러 가지이므로 이들의 성능을 만족시킬 수 있도록 레일의 마모량과 그 기준치를 정할 필요가 있다. 검사결과의 판정이나 검사주기의 결정 시에는 레일마모의 진행 정도를 고려할 필요가 있다. 레일의 손상이나 균열과 같이 정량적인 측정, 평가가 어려운 항목에 대하여도 정도에 따른 판정기준을 정해두어 적극적으로 정량적인 검사가 가능하게 한다.

다른 부재에 대한 측정항목, 측정주기, 판정기준 등의 고려방법도 마찬가지이다. 〈표 3〉에 나타낸 요구 성능이 만족되도록 대응하는 평가지표와 기준치를 정한다.



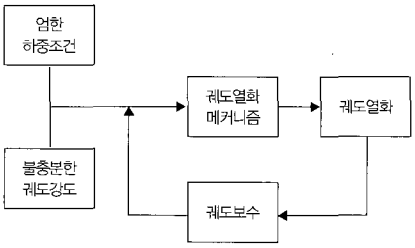
〈그림 2〉 정비 목표치, 정비 기준치 및 안전상 한도치의 관계

5. 경험기술로부터 탈피하는 궤도기술

5.1 궤도기술과 경험기술

상기에서도 언급하였지만, 궤도는 열차하중으로 인하여 상시 변형되고 있으므로 이것을 정기적으로 정정하는 것을 전제로 하고 있다. 또한, 궤도는 흙 구조물 위에 직접 부설되는 경우가 많기 때문에 같은 구조라도 궤도열화의 속도가 위치에 따라 크게 다른 점 등 지금까지의 많은 연구개발에도 불구하고 궤도열화 메커니즘이 완전히 해명되었다고는 말하기 어렵다.

그러나, 궤도는 열화에 수반되는 일상적인 보수가 필요하며, 현장에서는 담당 기술자의 경험에 의거한 판단에 따라 보수를 수행하고 있는 것이 실태이다. 이와 같은 궤도보수의 흐름을 〈그림 3〉에 나타낸다. 궤도열화 메커니즘이 블랙박스에 가깝다는 것을 용인하고 있는 사정이 "궤도기술은 경험기술이다"라고 불려지는 까닭이다. 일반적으로 고려되는 경험기술의 득실을 〈표 4〉에 나타낸다.



〈그림 3〉 경험기술을 구성하는 루프

〈표 4〉 경험기술의 득실

장점	· 실적이 있어 신뢰할 수 있다. · 단기예측의 정밀도가 높다. · 시책으로서 받아들이기 쉽다.
단점	· 실적을 얻기 위하여 시간이 걸린다. · 상황의 변화에 대응할 수 없다 · 우수한 기술자만 경험화할 수 있다.

5.2 경험기술로부터 탈피의 의미

궤도기술에 한정되지 않는 성숙한 기술분야에서는 경험이 극히 중요한 기술요소이다. 그러나, 일단 안정된 기술이라도 철도를 둘러싼 환경의 변화에 따라서 그 성능이 상대적으로 점점 저하하는 것은 피할 수가 없다.

이상과 같은 관점에서 보면, 연구개발의 목적은 경험기술의 상대적 성능열화를 인식하여 새로운 이론, 방법, 재료 등의 도입으로 새로운 성능을 부가하는 것을 고려할 수가 있다. 예를 들어, 근년의 IT기술의 발달은 궤도관계의 기술개발에서 큰 변화를 가져오고 있다. 구체적인 툴로서는 다음의 것이 열거된다.

· 모니터링기술
· 해석기술
· 예측기술
· 최적화기술

이하에서는 이들의 항목에 대한 최근의 연구개발의 예를 소개한다.

5.3 구체적인 툴

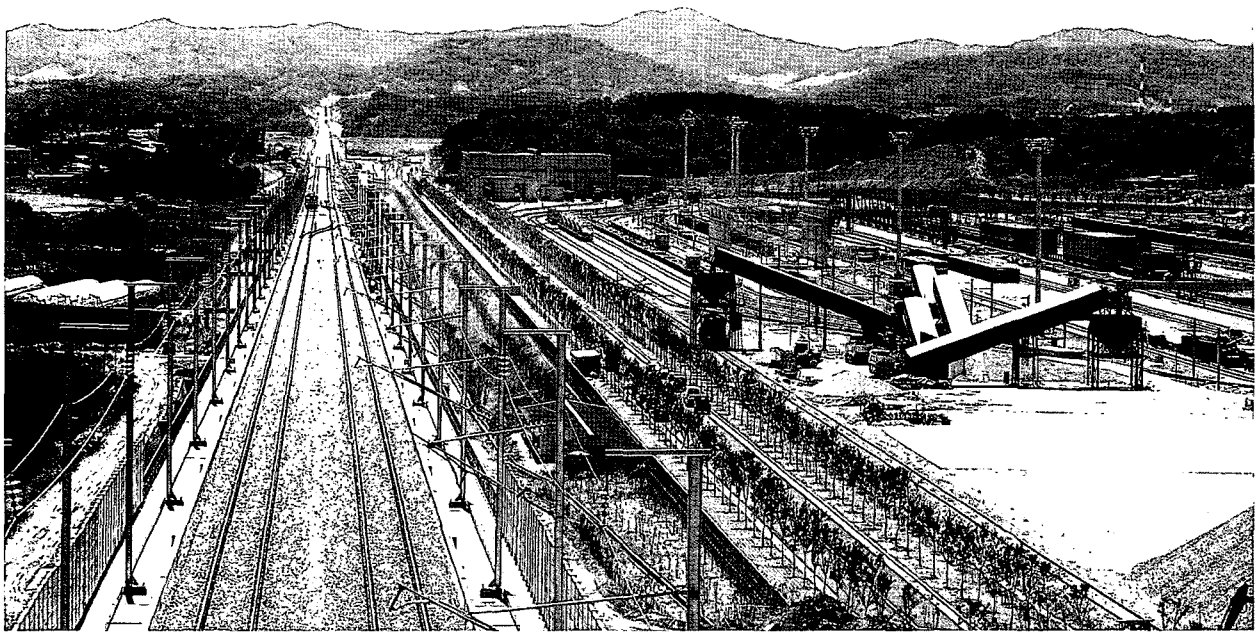
5.3.1 모니터링기술

현상해명의 기본은 현상의 정확한 파악이다. 특히, 궤도는 '옥외에 부설된 장대한 구조물' 이라고 하는 점도 있어 궤도에서 가장 기본적인 궤도 침하량에 대하여도 지금까지 정확하고 장기적인 측정이 곤란하였다. 예를 들어, 한냉지의 경우에 동계에는 궤도가 동상함에 따라 들어올려지고 해빙기에는 저하하는 점, 전체로서 보면 열차 통과 톤수와 함께 침하하고 있는 점이 포착된다. 이와 같은 각종 궤도열화의 현상에 대하여는 앞으로 센서류의 진보, 데이터 수록, 혹은 데이터 전송기술의 진보에 따라 대단히 분산이 많은 항목이어도 데이터 수를 늘림으로서 현상의 메커니즘을 포착하는 것이 기대된다.

5.3.2 해석기술

궤도관계 기술에서 궤도전체로서의 모델화는 어느 정도 행하여져 왔지만 레일 이음매, 분기기 등의 부재에 대하여는 부설조건에 따른 차이가 극히 크다고 하는 사정도 있어 해석적인 검토가 늦어져 왔다. 개개의 부재에 관한 해석적인 연구의 예는 다음과 같다.

분기기는 하중조건이 극히 엄하다고 하는 점에서 과거의 경험에 의거하여 손상부분을 강화하는 방법으로 구조가 개



량되어 왔다. 그러나, 구조를 근원적으로 개량하기 위해서는 기본으로 되돌아가 각부에 대한 응력 해석으로부터 연구를 진행하는 것이 필요하다. 그 때의 툴은 역시 FEM이다. 망간 크로싱을 해석한 결과를 살펴보면 노스 앞쪽 윙의 아래 부분이 응력 최대 개소로서 허용 응력 이하이지만 통상은 검사할 수 없는 개소인 점에서 현상의 설계는 타당하다는 점이 확인되고 있다. 마찬가지로, 포인트부에 대하여도 해석하고 있다.

궤도관리의 분야에서는 궤도부재의 응력 해석과는 다르게 연속적으로 측정되는 각종의 데이터를 어떻게 궤도상태의 평가에 이용하는가가 과제이다. 일례로서, 축상 가속도의 웨이브릿(wavelet) 해석결과는 단파장 궤도틀림의 평가지표로서 활용되고 있다. 시간(위치에 대응), 스케일(주파수에 대응), 계수(진폭에 대응)의 3 요소를 종합적으로 분석함으로서 레일표면의 상태나 침목지지의 상태 등을 보다 적확하게 파악할 수 있는 예상이 얻어지고 있다.

5.3.3 예측기술

레일은 가장 중요한 궤도부재이며 레일 절손은 중대사고로 이어질 우려가 있는 점에서 장대레일 궤도에서는 손상이 보여지지 않아도 피로를 고려하여 소정의 통과 톤수에서 교환하고 있다. 이에 대하여는 피로시험으로 수명을 추정하여 교환주기 연장의 가능성을 제시하고 있다. 더욱이, 각종 레일 용접부분에 대하여 영업선로에 부설되어 있던, 누적 통과 톤수가 1.4~8억 톤에 달하고 있는 경년 레일을 수집하여 경년 플래시 벗 용접부분에 대해 피로시험을 실시하여 취득한 S-N 곡선과 과거에 실시한 신품레일 용접부분의 시험결과를 비교하면, 경년 레일의 피로한도가 저하하여 있는 것을 알 수 있다. 이들의 시험결과에서 잔존수명을 추정하여 레일의 교환주기를 현행의 기준보다 1~2억 톤 연장할 수 있음이 제시되고 있다. 한편, 구조가 불연속이고 마찰요소가 있는 점에서 해석이 곤란하였던 레일 이음매부분에 대하여도 응력 해석과 잔존 수명의 평가가 실시되고 있다.

5.3.4 최적화기술

궤도보수의 최적화에는 각종 레벨이 있다. 최종 목표는 궤도보수비의 최소화이지만, 지금까지는 해결하여야 할 과제가 많으며, 현 시점에서는 전체모델을 구성하는 부분모델

경험공학이라고 불려지는 철도공학 중에서도 특히 경험에 의지하는 부분이 많은 궤도구조, 궤도보수의 분야에서 합리적인 해석방법을 도입하여 안전성과 신뢰성의 향상을 도모함과 동시에 보수비의 저감을 위한 구체적인 제시가 필요하다.

을 구성하고 있는 단계이다.

(1) 궤도구조 요소의 최적화

자갈궤도는 구조적으로 소성변형을 허용하고 있는 점에서 열차통과에 수반하여 서서히 변형되는 것을 피할 수 없다. 변형된 궤도가 열차의 운행에 악영향을 미치지 않도록 보수하는 작업이 궤도보수비의 상당한 부분을 점하는 점에서 지금까지도 이에 대한 이론적, 또는 실험적인 연구를 진행하여 왔다. 최근에는 침목의 형상이나 치수, 자갈도상 두께 등과 같은 궤도구조 요소의 최적화에 관한 연구가 진행되고 있다.

(2) 궤도보수 시스템의 최적화

멀티플 타이 탬퍼 작업계획을 작성하기 위해서는 선구의 궤도구조, 운전상황, 궤도상태 열화의 속도, 보수기지의 배치 등과 같은 많은 조건을 감안할 필요가 있는 점에서 지금까지는 기술자의 경험에 의거하여 작성하여 왔다. 궤도보수 체제의 변화에서 이와 같은 경험이 있는 기술자를 확보하는 것이 곤란하게 되어 가고 있지만, 이와 같은 멀티플 타이 탬퍼 작업계획의 자동화와 최적화에 관한 요구가 높아지고 있다. 궤도보수 실적과 이 시스템을 적용한 경우의 보수량을 비교하면, 선구가 복잡한 경우는 제약조건이 많으므로 효과가 적게 되지만 선구가 단순한 경우는 개선효과가 크다.

6. 맺음말

경부고속철도의 개통을 계기로 국내의 철도산업은 현재 활발하게 발전하고 있으며, 신선로의 건설은 궤도기술이 비약할 수 있는 기회이다. 기설 노선의 유효 활용, 승객요구의 다양화, 소음 · 진동 등의 연선 환경보호, 지구환경 보호 등 철도에 요구되는 기술개발 항목은 산적되어 있다. 또한, 그들을 실현하기 위해서는 비용을 절감하는 등 철도운영의 전전화가 불가결하다. 그 중에서 궤도기술이 달성할 수 있는 역할은 충분히 크다고 할 수 있다.

궤도기술 연구개발의 어려움은 그 성능이 부설 현장의 상황에 극히 크게 영향을 받는 점이며, 어떤 장소에서는 좋게 평가받았더라도 다른 장소에서는 문제로 되는 경우도 드물게 보여진다. 궤도의 약점인 레일이음매부와 분기기의 메커니즘에 관한 연구는 초보단계이다. 경험공학이라고 불려지는 철도공학 중에서도 특히 경험에 의지하는 부분이 많은 궤도구조, 궤도보수의 분야에서 합리적인 해석방법을 도입하여 안전성과 신뢰성의 향상을 도모함과 동시에 보수비의 저감을 위한 구체적인 제시가 필요하다.

한편, 유지관리 표준의 근거에 흐르는 사상은 "열차가 안전하고 원활하게 주행할 수 있을 것"이지만 안전상 진실의 한도치는 실은 잘 이해되지 않았다. 따라서, 여러 철도에서 이용되고 있는 규정 등은 지금까지의 실적이나 사고의 경위 등에 입각하여 정해진 것이 많다. 이러한 지혜의 대부분은 현재에도 충분히 통용되고 있지만 기술적인 근거가 애매한 것도 사실이다. 새로운 유지관리 표준에는 경험공학으로서 철도공학을 활용함과 동시에 선배들의 경험에 뒤떨어지지 않을 만큼의 기술적인 식견을 함께 담는 것이 필요하다.

경험기술을 소중하게 생각하는 것은 높은 신뢰성이 요구되는 철도사업의 성격에서 당연한 것이다. 근래에 철도사업을 둘러싼 환경은 더욱 엄하게 되어가고 있으며, 더욱 더 보수비의 삭감이 요구되고 있다. 이에 수반하여 궤도보수요원의 감소나 아웃소싱의 보급 등에 따라서 지금까지 배양되어 온 경험을 차세대의 기술자에게 전하는 것이 곤란하게 되어 가고 있다. 이와 같은 상황에서 경험이라고 하는 과거의 자산에 의지하지 않는 새로운 기술개발의 방향을 찾아내는 것이 필요하다. 궤도열화 메커니즘에 기초한 궤도보수 기술의 체계화는 장래 기술개발의 단계적 증대뿐만이 아니라 현재의 궤도 보수수준을 유지하기 위하여도 불가결하다고 생각된다.