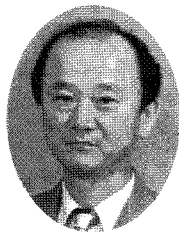
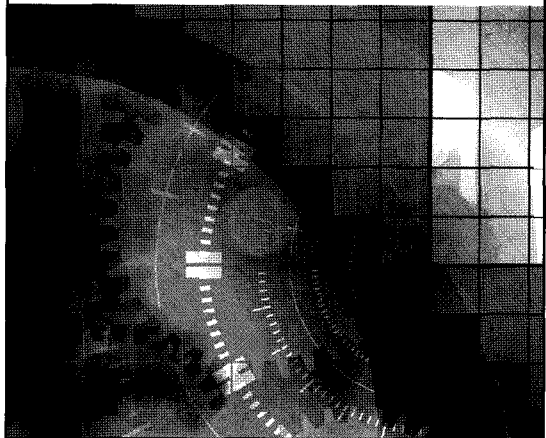


• • •  
**고속화 수단과  
최고속도 결정방법의  
이해**



**서 사 범**  
한국철도시설공단  
일반철도궤도처장/  
공학박사·철도기술사



### 1. 머리말

철도는 여객수송의 분야에서 자동차·항공기 등과 경쟁 중에 있으며, 총수송과 총수입에 미치는 각종 항목 중에서 경제 성장률, 도로교통망 및 에너지 비용은 외부 환경조건 이고 속도, 운임 및 선로망은 내부 조건이다. 본고는 이 중 에서 속도에 관련된 사항을 논의한다.

우리나라 철도의 최고속도는 고속선로에서 300km/h, 일반선로에서 150km/h이다. 열차 최고속도의 향상은 여 객에 대한 편리성의 향상이나 다른 교통기관과의 경쟁이 라는 관점에서 앞으로도 필요 불가결하다. 최고속도는 원 래 궤도와 차량의 성능만으로 정해지는 것이 아니다.

본고에서는 먼저 일반적인 철도의 고속화에 관하여 논 의한 다음에, 최고속도의 결정방법과 관련하여 차량 성능 과 궤도의 상호작용에 관하여 상술하고, 아울러 집전 시스 템 등 궤도와 직접 관계가 없는 사항에 대하여 개설한다.

### 2. 철도의 고속화

#### (1) 고속화의 의미

“고속화”라고 하는 말이 갖는 의미는 넓다. 일반적으로 는 최고속도를 올리는 의미로 이해하는 경향이 많지만, 고 속화는 어디까지나 목적지에 빠르게 도달하기 위하여 시 행하는 것이며 궁극적인 목적은 도달시간의 단축으로 된 다. 즉, 고속화는 본래 낭비시간인 이동시간을 적게 하기 위하여 평균속도를 올리는 것을 의미하며, 최고속도를 올 리는 것과 반드시 일 대 일로 대응하지 않고 몇 개의 수단을 포괄하는 것으로 된다.

#### (2) 고속화의 가치

철도에 한하지 않는 교통기관은 지금까지 최고속도를 올리는 것을 포함하여 고속화에 대하여 대단히 열의를 기 울여왔다. 교통기관의 고속화가 큰 가치(merit)를 갖는 점 은 고속철도의 출현으로 세계의 철도가 재생하기 시작한 것을 보아도 알 수 있다.

가치의 하나는 시간의 가치가 점점 높아져 가는 중에 고속화로 얻어지는 단축 시간을 새로운 노동력으로 사용할 수가 있다는 점이다. 또는, 여가 시간의 생산으로 이어지는 이른바 국민적 이익(gain)을 새로 창출한다고 할 수가 있다. 이에 대하여는 이전부터 여러 가지 양적인 평가가 있었지만 단순히 계산하더라도 막대한 금액으로 되는 점은 잘 알려져 있다.

또 하나는 사업자로서의 메리트이다. 고속화하면 확실히 여객과 화물이 늘어나는 점을 각 교통기관의 과거 실적이 나타내고 있으므로 비용 대 효과(cost performance)를 정확하게 추구하고 효과가 있다고 예측되는 경우에 고속화를 추진하면 반드시 좋은 성과를 얻을 수 있다.

### (3) 고속화의 수단

이동시간의 단축이라고 하는 의미의 고속화 수단은 이전부터 여러 가지가 취하여지고 있다. 가장 보편적으로 이용되는 수단은 역시 “최고속도의 향상”이다.

최고속도의 향상은 이미지로서도 가장 효과적이며 사회에서 알기 쉽다. 또한, 기술레벨을 재는 척도로서도 사용하기 쉬우므로 국내뿐만 아니라 해외와의 기술협력이나 해외진출을 위한 협상 등에서 무기로 되는 일이 많다. 이 때문에 지금까지 세계의 여러 나라에서는 최고속도를 올리기 위하여 차량, 궤도, 전기설비 등 폭넓은 분야에서 많은 기술개발을 수행하여 왔다.

또 하나의 유효한 방법은 “곡선의 통과속도”를 올리는 방법이다. 일반적으로, 곡선을 고속으로 주행할 때의 제약요소로서는 외궤 측으로의 탈선 전복, 횡압의 증가, 초과 원심력으로 인한 승차감의 악화 등이 있다는 점은 잘 알려져 있다.

이 중에서 탈선 전복을 방지하기 위해서는 차량의 중심을 적극적으로 낮추는 것으로 대처하고, 또한 횡압을 작게 하기 위해서는 차량을 경량화하든지 자기조타 대차를 개발하여 전향 횡압을 작게 하기도 하여 이것에 대응하여 왔다. 남아 있는 장해(neck)는 승차감의 문제이며, 이에 대하여 이탈리아, 스웨덴, 독일, 일본 등 외국에서는 초과 원심

력을 제거하기 위하여 진자(振子) 시스템을 채용하는 방법이 널리 시행되어오고 있다.

근년에 들어 일반철도의 속도향상(speed up)에 관한 보편적인 특징은 곡선통과 속도의 향상이다. 이 때 궤도 측에서 보면, 곡선통과 속도에 대하여는 곡선반경, 캔트, 완화곡선 등의 곡선선형 제원이 결정요인이다. 어느 경우에도 주행 안정성으로부터 정해지는 “절대기준”과 승차감으로부터 정해지는 “목표치”의 2 단계로 이루어지며, 실제로는 선구의 상황에 따라서 확정된다.

곡선통과 속도의 결정 시에 가장 중요한 기술기준은 캔트 부족량이다. 캔트 부족량은 승차감의 평가지표이지 주행 안정성에는 관계가 없다고 하는 주장도 있지만, 캔트 부족량은 차체에 작용하는 수평방향의 힘에 비례하므로 일정 이상으로 되면 주행 안정성의 평가지표로 된다. 근년에는 차량의 경량화가 진행되고 있어 곡선통과 시에 바람으로 인한 전도 안정성에도 캔트 부족량이 직접적인 평가지표로 된다.

고속화에는 그 외에도 더욱 단적인 방법으로서 정거역의 수나 정거시간을 줄임에 따른 “평균속도의 향상”, 또는 다른 관점에서 “열차횟수 증가(frequency up)” 등의 수단도 있지만 스스로의 한계가 있어 실제로는 최고속도나 곡선 통과속도의 향상에 의존하는 일이 많다.

### (4) 고속화의 과제

이러한 고속화를 달성하기 위해서는 몇 가지 기본적인 과제가 있다.

첫째로, 고속화를 달성하기 위해서 “안전성”을 손상하는 일이 없어야 하는 점은 두 말할 필요도 없다. 이 때, 고속화에 따른 안전성의 검증은 처음부터 외부 원인에 대한 안전성의 확보도 아울러 고려하여두어야 한다. 예를 들어, 지진이나 강우 등의 천재에 대하여도 고속화로 인하여 철도 시스템의 안전도를 손상시키는 일이 없도록 하는 것은 중요하다.

둘째로, 고속화에 한하지 않는 향후의 새로운 시책을 강구할 때는 소음·진동 등의 “환경 문제”를 빼놓고는 논할

수가 없다. 특히, 고속화의 경우는 환경 보전이 장애물(hurdle)로 되는 일도 많으므로 충분한 배려가 필요하게 된다.

셋째로, 고속화를 달성하기 위해서는 최고속도를 올리든지 곡선 통과속도를 올리든지의 여하를 불문하고 그 수단이 일반적으로 막대한 “비용”을 필요로 하는 일이 많다. 따라서, 실제로 그 시책을 실행에 옮길 때는 충분히 그 효과를 검증하여 수요에 대응하는 시책으로 할 필요가 있다.

### (5) 고속화에 대한 도전

철도기술의 역사는 상기에서도 언급하였지만 “안전과 속도(speed)에 대한 도전”이었다고 하여도 과언이 아니다. 안전은 철도라고 하는 대량 교통기관이 존재하는 원점이고 속도는 철도의 시장 경쟁력과 기술의 심벌이라고 할 수 있으며, 고속 철도는 이 두 개의 명제(thesis)에 정면으로 도전한 새로운 철도의 모델을 나타낸다고 할 수 있다.

속도는 앞으로도 “철도기술”의 중요한 연구 테마임에 틀림없다. 특히, 시장의 통합을 이룩하고 있는 유럽에서는 고속철도가 국경을 넘는 교통의 네트워크를 이룩하고 공항, 도로의 혼잡 문제나 환경 문제의 개선을 위한 수단으로서 중요한 정책 과제로 되어 있다. 또한, 고속운전을 실현하기 위해서는 차량, 선로, 구조물, 전기설비, 제어 시스템 등 모든 철도기술 분야의 진보가 필요하며 속도에 도전하는 것은 철도기술 전반의 진보에 연결된다. 속도에 대한 도전은 철도기술의 기본적인 과제임과 동시에 철도기술에 관련되는 사람을 끌어당기는 특수한 마력을 갖고 있다. 단순한 기술개발을 넘어 실용을 목표로 하는 경우에는 “사업 전략으로서의 속도향상(speed up)의 의미”를 음미하여야 한다고 생각된다.

첫째는 속도향상이 갖는 “사업 전략”으로서의 의의이다. 세계최초의 고속철도를 건설할 당시에는 도래하여야 할 교통혁명을 선도하는 고속화가 철도의 생존(survival)을 결은 전략이었다고 한다. 그러나, 고속철도망이 어느 정도 구축된 후의 기존선 고속화는 여러 가지 기술적 전략의 하나에 지나지 않는다.

둘째는 “비용(cost)”과의 관계이다. 제(3)항에서 언급한 것처럼 속도 향상을 사업으로서 추진하기 위해서는 당연한 것이지만 비용에 걸맞은 효과, 혹은 효과의 성과보다 적은 비용으로 실현하지 않으면 곤란하다. 고속화를 위한 비용, 환경문제의 비용 등을 고려하면 고속화의 비용 문제는 앞으로 엄한 과제로 될 것으로 생각된다.

셋째로, 고속운전을 실현하기 위해서는 “오랜 시간과 기술의 축적”이 필요하다. 세계 최초로 200km/h의 시운전을 실현한 것은 1903년 독일 베를린의 교외이었다. 200 km/h의 영업운전이 시작된 것은 그 때부터 61년 후이다. 프랑스 국철은 1955년의 시운전에서 331km/h에 달하였지만 그 속도는 아직 영업상의 실용 속도로는 되어 있지 않다. 기존 시스템의 속도 향상에서도 시운전의 성공과 실용화의 사이에는 반세기의 시간이 필요한 것이다.

넷째로, “에너지의 문제”이다. 현재야말로 에너지 문제가 소강(小康)을 유지하고 있지만 멀지 않은 장래에 이 문제가 아주 심각하게 될 가능성은 크다. 또한, 현재 큰 과제로 되어 있는 지구환경 문제도 에너지에 관계하는 부분이 크다. 이와 같은 관점에서 보면 철도 사업도 단지 다른 교통기관과의 상대적인 에너지 효율의 우위를 강조하는 것만이 아니고 에너지 절약형의 시스템을 지향하여야 한다.

고속화에의 도전은 앞으로도 철도의 기술진에게 중요한 과제이다. 그러나, 그것은 철도 사업의 근대화, 생산원가 절감(cost down), 정보 시스템의 개선 등과 병행하는 일반의 테마일 것이다. 그것도 비용, 환경, 에너지 등과의 조화가 요구되는 어려운 과제이다. 한편으로 “성공체험의 매몰”을 조직의 쇠퇴에 이르는 병의 하나로 열거하는 사람도 있다. 고속철도의 성공이라고 하는 큰 체험을 어떻게 살려 어떤 교훈으로 살려 가는가가 지금까지의 고속화에 대한 철도기술자의 과제일 것이다.

### 3. 최고속도의 결정 요인

철도의 속도 향상에는 최고속도 외에도 여러 가지의 제약요인이 있다. 제2장에서도 논의하였지만, 기준선을 고

속화하는 경우에 속도를 결정하는 요인으로는 ① 차량 및 궤도, 전기, 신호 등 지상설비의 성능과 보수수준을 감안한 최고속도, 곡선 통과속도, 분기기 통과속도 등과 같은 “물리적 능력”과 ② 영업정책 및 정거 역 설정, 접속, 열차간 속도차이, 대피, 열차교환 등을 고려한 다이어그램의 구성 등과 같은 “소프트(soft) 능력”이 관계된다. 또한, 당해 노선이 처한 상황에 따라 고속화 전략이 달라진다고 할 수 있다.

이 중에서 열차 “최고속도”의 결정요인으로는 다음과 같은 것이 있다.

- ① 차량의 가·감속 성능
- ② 차량 각부의 진동
- ③ 궤도의 진동 전파
- ④ 집전 시스템(팬터그래프, 가선)의 진동 전파
- ⑤ 구조물의 공진
- ⑥ 공기 진동(소음, 미기압파 등)
- ⑦ 인간공학 상의 문제(승차감, 신호 확인거리 등)

즉, ①과 ⑦(신호 확인거리 등)을 제외하고는 (준정적인 것도 포함한) 진동 현상이다. 신호의 확인거리는 일반선로와 같이 지상 신호의 경우에는 문제로 되지만, 고속선로와 같이 차내 신호의 경우는 공학적인 제약 요인으로 되지 않는다.

한편, 궤도구조는 최고속도를 결정할 때 검토 요인의 하나이지만, 일정 이상의 강도가 확보되어 있으면 직접적인 제약조건으로 되는 일은 없다. 다만, 궤도틀림 진행을 고려한 궤도정비 레벨의 유지 가능성을 검토할 필요성은 있다.

이하의 제4장~제6장에서는 “최고속도의 결정방법”에 관련된 요인을 간결하게 논의한다.

#### 4. 차량의 가·감속 성능과 점착력

##### (1) 차륜/레일간의 점착력

철도는 강(鋼)차륜과 강(鋼)레일간의 마찰력에서 구동력을 얻는다. 자동차의 경우도 타이어와 아스팔트간의 마찰

력에서 구동력을 얻지만, 이 마찰력은 충분히 큰 값이며, 얼은 노면 등이 아닌 한 타이어가 활주하는 일은 거의 없다. 또한, 등판 능력도 철도보다 높다. 한편, 강차륜/강레일간의 마찰력은 타이어/아스팔트간에 비하면 대단히 작으며, 마찰력 이상의 회전력, 브레이크 힘을 차륜에 가하면 차륜이 공전(空轉), 활주(滑走)하여 버린다. 이 때문에 철도차량의 가·감속도에는 한계가 있다.

철도에서는 차륜/레일간의 마찰계수를 특히 ‘점착계수’라고 부른다. 점착계수( $\mu$ )와 윤하중(上下 하중)( $P$ )의 곱(積)이 점착력( $F$ )으로 되며, 이것이 차량의 가·감속 성능을 지배한다. 미끄럼(스키드) 속도( $\Delta V$ )가 작은 동안에는 점착계수가 미끄럼 속도에 비례하고, 미끄럼 속도가 어떤 일정 값으로 되면 포화한다. 이 포화한 시점에서의 점착계수는 차륜강과 레일강의 마찰계수에 거의 일치하며, 이 때의 점착력이 최대 점착력( $F_{max}$ )으로 된다. 최대 점착력 이상의 가·감속력을 가한 경우에는 차륜이 공전, 활주한다.

여기서,

$$\text{미끄럼 속도}(\Delta V) = \text{차륜의 회전속도(원주 속도)}(V_r) - \text{차륜의 진행속도}(V)$$

$$\text{미끄럼 륜} = (V_r - V)/V_r$$

$$\text{점착계수}(\mu) = F_{max}/P$$

우천 시와 같이 차륜/레일간의 마찰계수가 작은 경우에도 열차를 안전하게 가·감속하기 위해서는 점착계수를 항상 어떤 일정 값 이상으로 확보할 필요가 있다. 증기기관차 시대는 차륜/레일간에 모래를 뿌려 점착계수를 높였지만, 현재는 미소한 세라믹스 입자를 뿌려서 점착계수를 높이고 있다. 또한, 최근의 모터에서는 모터의 회전수에서 공전을 검출하여 일단 모터의 회전력을 낮추어 재점착시키는 제어 기술이 개발되고 있다. 점착 성능은 이들의 성과에 따라 이전보다 대폭적으로 개선되고 있다.

##### (2) 가속력과 점착력

점착계수, 즉 차량이 얻을 수 있는 점착력(=가속력)은 속도와 함께 서서히 저하한다.

한편, 속도를 올리기 위해서는 목표로 하는 속도까지 주

행 저항 이상의 가속력을 계속 주어야 한다. 주행저항에는 상기의 차륜/레일간이나 축받이, 치차 등과 같은 회전·접동 부분의 마찰력, 구배 오름, 공기저항 등이 있지만, 속도가 높게 되면 공기 저항이 지배적으로 된다. 또한, 공기 저항은 속도와 함께 증가한다. 따라서, 속도와 함께 저하하는 가속력과 속도와 함께 증가하는 주행 저항이 같게 되는 시점이 가속력의 한계로 되며 속도를 그 이상 올릴 수 없게 된다. 이것이 열차 최고속도의 상한으로 된다. 차량 형상을 개선하여 공기저항을 감소시키고 전술한 점착 성능을 향상시킴에 따라 주행 한계속도를 증가시킬 수 있다.

### (3) 감속력(브레이크 성능)

가령 선로 상에 장애물이 없고 선형 열차도 없다고 가정하면, 감속력이 최고속도를 결정하는 요인으로는 되지 않는다. 그러나, 영업 열차를 안전하게 운행하기 위해서는 열차 다이어그램이 혼란해진 경우에도 열차가 선형 열차에 충돌하지 않고 멈출 필요가 있다. 또한, 재래선로에서는 건널목에서 장애물이 검지되면 곧바로 정지할 수 있어야 한다. 한편으로, 차량의 감속도도 가속도와 같은 끌로 점착력으로 정해지는 한도가 있다. 따라서, 영업열차의 최고속도는 이들의 요인을 고려하여 정해지고 있다.

재래선로의 경우는 건널목에서의 안정성을 확보한다고 하는 관점으로부터 제동거리를 최대 600m로 정하고 있다. 이러한 관점에서 현재의 브레이크 성능으로는 일반적인 재래선로의 최고속도가 130km/h로 되어 있다. 재래선로에서 130km/h를 넘는 속도로 영업운전을 하는 경우는 건널목이 없는 구간으로 한정되고 있다.

고속선로에는 건널목이 없지만 특히 하구배가 연속하여 있는 경우에는 ATC 섹션 길이 이내(대개 2km)에서 정지할 수 있도록 영업 최고속도가 제한되고 있다.

## 5. 차량의 운동 및 궤도와 상호작용

### (1) 사행동

사행동이란 차륜 답면구배, 레일형상 및 윤축, 대차의

지지스프링 시스템의 특성에 따라 윤축, 대차가 자려 진동을 일으키는 현상이다. 사행동이 생기는 직접적인 원인은 차륜에 답면구배  $\gamma(= \tan\theta)$ 가 붙어있으므로 이에 따른 좌우 차륜의 지름차이로 인하여 윤축이 일정 파장으로 사행동하기 때문이다. 이것을 기하학적 사행동이라 부른다. 사행동의 파장은 레일과 차륜의 형상으로 정해지며, 또한 윤축, 대차가 좌우로 흔들리기 쉬운 진동수(고유 진동수)는 각부의 질량, 지지스프링정수로 정해진다. 고유 진동수에 대응하는 공간 파장은 속도와 함께 길게 되며 사행동의 파장과 일치하면 사행동이 발생한다.

대차의 설계 시에는 사행동 발생 속도가 영업속도보다도 충분히 높게 되도록, 또한 설사 사행동이 발생하여도 감쇠되도록 배려하고 있다. 한편으로 차륜의 답면구배나 윤축, 대차의 좌우 지지스프링정수는 대차의 곡선통과 성능과 밀접하게 되며, 또한 곡선통과 성능과 사행동 안정성은 상반되는 성능을 갖는다. 양자를 비교한 것을 [표 1]에 나타낸다. 차륜 지름

고속선로에서 사행동 안정성을 중시하여 차량을 설계하

표 1. 사행동 안정성과 곡선통과 성능

항목	사행동 안정성을 중시	곡선통과 성능을 중시
대차 회전성능	대	소
축상 지지강성	어느 정도 대	소
답면구배	소	대
축거	대	소
차륜 지름	대	소
궤간	대	소

면, 곡선통과 성능이 희생되므로 곡선통과에 수반하는 레일이나 차륜 플랜지의 마모가 문제로 된다. 이에 따라 고속선로 차량은 사행동 안정성을 약간 희생하게 하여 곡선통과 성능을 향상시키도록 설계하는 경우가 많다.

이상과 같이 사행동은 완전히 억제할 수가 없는 진동 현상의 하나이다. 차량 각부 스프링정수의 공차나 차륜 마모 상태에 따라서는 저대한 궤도틀림을 실마리로 하여 영업 속도 내에서도 사행동을 일으키는 일이 있다. 이 경우에 궤도의 각 부재도 큰 반력을 받으며 또한 궤도틀림도 급격

하게 진행되기 때문에 궤도관리의 입장으로서도 사행동 특성을 포함한 차량운동 특성을 의식하여 둘 필요가 있다.

○ 윤축과 대차의 사행동

여기서, 윤축과 대차의 사행동 파장에 대하여 약간 상세히 살펴본다. 이 진동은 통상적으로 급속하게 감쇠하여 윤축의 중심이 궤간 중심 부근을 진행하도록 돕게 된다. 그러나, 어느 한계속도를 넘으면 이 진동이 불안정하게 되고 증대하여 탈선이나 궤도틀림의 위험이 생긴다. 이 때문에 이 한계속도가 영업속도를 크게 상회하여 안전이 확보되도록 대차를 설계한다.

먼저, 윤축의 사행동을 살펴본다. 사행동은 그 진동의 파장이 정해져 있으며, 윤축 단체(單體)의 모델을 고려하면, 윤축의 사행동 파장( $S_1$ )은 다음의 식으로 계산할 수 있다. 여기서,

$b$ : 좌우 레일/차륜 접촉점 간격의 반분

$$S_1 = 2\pi \sqrt{\frac{br}{\gamma}} \quad (1)$$

$r$ : 차륜반경

$\gamma$ : 레일/차륜 접촉점에서 차륜의 답면구배

만일, 차륜 답면이 원뿔 꼴(圓錐形)이 아니고 원호 형상인 경우에는  $\gamma$  대신에 다음 식의 유효 답면구배  $\gamma_0$ 를 대입한다.

여기서,

$\rho_R$ : 레일 단면의 반경

$$\gamma_0 = \frac{\gamma}{1 - \frac{\rho_R}{\rho_W}} \quad (2)$$

$\rho_W$ : 차륜 답면의 반경(통상은  $\cap$  형상의 면이므로 값이 음)

윤축의 불안정 진동을 일으키는 한계속도( $\nu_c$ )는 다음과 같다.

여기서,

$$\nu_c = S_1 \sqrt{\frac{b^2 f_y + i^2 f_\phi}{b^2 + i^2}} \quad (3)$$

$b_1$ : 좌우 축상 간격의 반분

$k_x$ : 1 차축당 전후방향의 축 스프링정수

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_y}{m}}, \quad f_\phi = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_x \cdot b_1^2}{m i^2}}$$

$k_y$ : 1 차축당 좌우방향의 축 스프링정수

$m$ : 윤축의 질량

$i$ : 윤축의 중심에 대한 관성반경

이와 같이 레일과 차륜 답면의 형상에 따라 사행동 파장이 정해지며, 사행동 파장과 축 스프링의 제원에 따라 한계속도가 정해진다. 결국, 레일과 차륜의 형상은 주행 안정성에까지 영향을 주는 것이다.

다음에, 대차의 사행동을 살펴본다. 축 스프링의 영향을 무시하여 보기 대차의 모델을 고려하면, 윤축 단체의 경우보다 긴 별도의 사행동 파장( $S_2$ )이 존재한다.

$$S_2 = S_1 \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (4)$$

여기서,

$a$ : 축거의 반분

대차의 한계속도는 (3) 식의  $m, i$ 를 대차의 값으로,  $k_x, k_y$ 를 볼스터 스프링의 값으로 바꿔 읽은 후에 다음과 같이

$$i \rightarrow i \frac{a}{b}, \quad k_x \rightarrow k_x \left(\frac{b}{l}\right)^2, \quad \frac{br}{\gamma} \rightarrow \frac{br}{\gamma} \left(\frac{b}{l}\right)^2$$

치환하면 구할 수가 있다.

$$l = \sqrt{a^2 + b^2}$$

여기서,

이상과 같이 통상적으로는 불안정하게 되는 일이 없기는 하나 차량은 원래 어떤 파장으로 진동하기 쉽게 만들어져 있으며, 레일과 차륜의 답면 형상은 그 파장을 정하는 요소로 되어 있다.

## (2) 차량 진동

궤도틀림이 있는 선로 위를 열차가 주행함에 따라 차량의 각 부위가 진동한다. 또한, 궤도의 각 부위는 차량 진동의 반력을 받는다. 물체가 받는 힘은 질량과 가속도의 곱이므로 진동 가속도가 크게 되면 차량, 궤도를 구성하는 각 부재에 작용하는 힘도 크게 되어 경우에 따라서는 파괴에 이르는 일이 있다. 또한, 부재가 파괴되지 않은 경우에도 과도한 차체 진동은 승차감에 악영향을 미친다.

철도차량은 질량, 스프링이 복잡하게 조합된 시스템이다. 어떠한 진동 시스템도 질량, 스프링정수, 감쇠정수에 의하여 흔들리기 쉬운 주파수(고유 진동수)를 갖는다. 입력되는 외력의 주파수가 고유 주파수와 일치하면, 이른바 공진 현상을 일으켜서 진폭이 급격하게 증대한다. 전 항의 사행동도 윤축, 대차 및 이들을 지지하는 스프링 시스템의 공진이 구동력에서 에너지를 얻음으로 인하여 감쇠되지 않고 지속하는 현상이다.

차량의 진동은 주로 궤도틀림으로 인하여 차륜이 받는 강제 변위로 말미암아 야기된다. 이 궤도틀림은 일반적으로 파장이 길게 될수록(주파수가 낮게 될수록) 진폭이 크게 되는 성질을 갖는다.

한편, 열차속도가 높게 됨에 따라 같은 시간 주파수에 상당하는 공간 주파수가 낮게(파장이 길게) 된다. 예를 들면, 주파수 1Hz(1/s)에 상당하는 공간 파장(주파수의 역수)은 속도 200km/h에서 56m, 300km/h에서 83m로 된다. 이들의 관계에서 속도가 높을수록 같은 시간 주파수에 대

응하는 궤도틀림의 진폭이 크게 되고 이에 수반하여 차량, 궤도에 발생하는 진동 가속도가 크게 된다. 속도가 높게 됨에 따라 장파장 궤도틀림의 정비가 요구되는 것은 이 때문이다. 한편으로 궤도틀림의 정비에도 경제적인 한계가 있기 때문에 부재 응력, 부재의 피로(응력 진폭), 승차감 등을 고려한 영업 최고속도는 궤도틀림 정비의 정도에 수반되는 한계가 존재한다. 다만, 실제로는 영업 최고속도의 상승에 수반하여 궤도틀림의 정비한도가 엄하게 된다고 고려하여야 한다.

## 6. 집전 시스템, 구조물, 공기 등의 진동 및 기타

### (1) 집전 시스템의 진동

가선(트롤리 선, 카테너리)은 펜티그래프로부터 힘을 받아 변위한다. 이 변위는 파(波)와 같이 전해져 간다. 이 파가 전하는 속도를 파동전파 속도라고 부른다. 열차의 속도가 파동전파 속도와 비슷해지면 가선의 변위가 급격하게 증대하여 이선(離線), 가선의 파단에 이른다. 초음속 비행기가 음의 속도를 넘을 때에 충격파가 발생하는 것과 같은 원리이다. 따라서, 전철화 선로에서는 가선의 파동전파 속도가 최고속도를 결정하는 요인의 하나이다.

가선의 진동에 수반하는 여러 문제는 파동전파 속도가 열차속도보다도 3할 이상 높으면 실용상 문제가 없는 것으로 되어 있다. 파동전파 속도를 올리기 위해서는 가선의 장력을 높이든지, 가선의 단위 길이당 질량을 작게 할 필요가 있다. 이들은 상반되는 성능이지만, 현재는 경량·고강도의 가선 재료를 개발하여 실용화하고 있다.

더욱이, 궤도에서도 진동이 레일 위로 전파되어가지만 전파속도가 열차속도보다도 상당히 높기 때문에 이것이 문제로 되는 일은 없다.

### (2) 구조물의 공진

교량 등의 토목 구조물도 철도차량과 마찬가지로 고유 진동수를 가진다. 철도교와 도로교 설계에서의 큰 차이는 대차간격, 축거에 상당하는 일정 간격으로 열차하중이 작

용한다고 하는 점이다. 이 간격의 시간 주기는 속도의 증가와 함께 짧게 된다(주파수는 높게 된다). 속도의 증가에 수반하여 열차하중의 주파수가 높게 되며, 이것이 구조물의 고유 진동수와 일치하는 경우에는 구조물이 공진하여 부재 응력이 허용 응력을 넘는 일이 있다.

철도교는 일반적으로 고유 진동수가 열차하중의 주파수보다도 충분히 높게 되도록 설계되어 있지만 경간(span)이 긴 교량은 구조상 고유 진동수를 그다지 높게 할 수가 없다. 이 때문에 고속화에 수반하여 공진이 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다.

### (3) 공기의 진동

이른바 소음, 미기압파가 여기에 상당한다. 특히 공기와 차량 각부의 마찰로 인하여 발생하는 공력 소음은 속도의 6승에 비례하여 크게 되기 때문에 열차의 영업 최고속도를 결정하는 중요한 요인으로 되어 있다.

공력 소음을 감소시키기 위해서는 차체 선두형상, 팬터그래프 형상의 개선, 차체 표면요철의 감소 등이 필요하다. 또한, 차체 선두형상의 개선은 미기압파의 감소에도 효과가 있다.

### (4) TGV의 세계 최고속도

TGV가 1990년 5월에 기록한 515.3km/h의 세계 최고속도는 [표 2]의 조건에서 이루어졌다. 이 최고속도가 곧바로 영업속도 향상으로 이어지지는 않았으나 그 후 프랑스에서의 영업속도가 300km/h로 되는 획기적인 사건

표 2. TGV 최고속도 기록 시의 사양

항 목	효 과
부수차 3량(영업시 10량)	공기저항 감소 MT비 개선
차륜 지름을 170mm 증	출력 향상 사행동 안전성 개선
가선 장력 20kN → 30kN	파동 전파속도의 향상
요 댐퍼 4조/1 대차 (영업시 2조/1 대차)	사행동 안전성 개선
연결부 포장 취부 선두차 하부 커버	공기저항 감소
선형 : 연속 하구배	주행저항 감소

(epoch)으로 된 점은 특기하여야 한다고 할 수 있다.

## 7. 맺음말

이상과 같이 철도의 고속화에 대하여 논의함과 동시에 최고속도를 결정하는 요인을 간략하게 개설하였지만, 향후의 속도 향상을 위해서는 선로, 차량, 전기 분야에서 어떠한 배려를 하여야 하는가, 또는 앞으로 어떠한 기술 개발이 필요하게 되는가를 이해하는데 본고가 다소라도 도움이 되기를 기대한다.