

# 분산형 고속전철의 승차감 향상을 위한 진동저감 기술 개발

최고 시속 400km급 분산형 고속전철은 기존의 동력집중형에 비해 진동에 취약한 구조이다. 그럼에도 불구하고 보다 나은 승차감을 구현하기 위해서는 진동발생 및 진동전달 과정을 이해하여 최적의 현가장치 및 차체구조를 설계하여야 한다. 이 글에서는 개발 중인 분산형 고속전철의 승차감 목표와 관련 진행 연구를 소개한다.

최연선 성균관대학교 기계공학부, 교수

e-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr

한국에서의 철도 관련 엔지니어링은 국내 근대 엔지니어링 효시로서 100년의 역사와 경험을 가지고 있다. 근간에는 경부고속전철을 성공적으로 운행하고 있고, 순수 국내 기술로 제작된 최고속도 350km/h급 한국형 고속전철인 KTX-II를 실제 운행에 투입한 바 있다. 그러나 금번 개발하고자 하는 400km/h급 차세대 분산형 고속전철은 기존의 고속전철 기술을 한 단계 끌어 올리는 연구로서 결코 쉽지 않은 연구개발 사업이다. 고속전철 개발의 핵심기술 중 하나인 진동, 소음 및 동역학 관련 기술은 1980년대 이후 국내에서 본격적으로 시도된 기술로서 자동차, 가전제품 등에 적용되어 국내 기계 관련 제품의 품질 향상에 크게 기여하고 있으나 이론에 대한 확실한 이해와 이를 바탕으로 한 응용은 아직 미흡한 상태이다.

차세대 분산형 고속전철은 동력집중식 고속전철에 비해 탑승인원 증가가 가능하여 경제성이 양호할 것으로 예상된다. 다만 분산형 고속전철은 기존의 고속전철과 달리 개별 차량에 모터와 감속기를 장착함으로써 주행 시, 동력시스템에서 유발한 진동이 승객에게 보다 용이하게 전달될 수 있는 구조이다. 그럼에도 불구하고 개발하고자 하는 차세대 분산형 고속전철은 최고속도 400km/h 주행 시 UIC 513R 승차감지수 1.8을 확보하고자 하며, 이는 일반적인 고속전철 시스템성능 요구사항인 승차감지수 2(deluxe rolling stock)를

증가하는 목표이다. 또한 차량 바닥진동은 승차감과 더불어 주요 실내소음 유발인자로서 최고속도 400km/h에서도 한국형 고속전철인 KTX-II의 설계최고속도 350km/h에서의 진동값 이하가 되게 함으로써 정숙한 실내 환경을 확보하고자 하고 있다.

## 승차감 평가

철도차량의 승차감은 주행 중 인간이 느끼는 종합적인 감성으로 평가되나 각각을 정량적으로 평가하기에는 한계가 있으므로 일반적으로 주행에 따라 발생하는 진동에 대한 인체민감도를 철도차량의 승차감으로 평가하게 된다. 승차감 평가는 직선 평탄선로에서 공차상태로 실제 영업 운행상에서 발생하는 차량의 다양한 운행속도와 최고 운행속도로 주행하면서 차량의 중심과 전·후 대차 상부에서 가장 가까운 좌석 등 3곳에 가속도계를 장착하여 측정된 가속도신호를 이용한다. 국내에서 사용하는 평가기준은 국제표준화기구 [ISO: International Standardization Organization]의 "ISO 2631"과 Sperling의 "승차감 지수(Wz)"가 사용되어 왔으나, 최근에는 ISO 10056, 2631-4와 국제철도연맹[UIC: International Union of Railways]의 UIC 513R이 주로 사용되고 있다. UIC 513R은 그림 1과 같이 5초간 주행하는 철도차량의 실

내 바닥에서 측정된 진동데이터 60개에 대해 푸리에 변환하여 주파수 영역으로 변환시키고, 인체민감도를 고려한 주파수보정을 행한 후에 x, y, z 각 방향에 대한 진동가속도 실효값의 크기를 가로축으로, 동일한 진동가속도 크기의 누적빈도를 세로축으로 한 누적빈도 분포 그래프를 그려, 도수 분포가 50%와 95% 범위인 값을 선정하여 승차감지수 N을 계산한다. 이때 진동에 대한 인체민감도를 고려한 주파수 가중함수는 수직방향과 수평방향에 대해 4~12Hz와 0.6~2Hz에서 각각 민감하게 설정되어 있다.

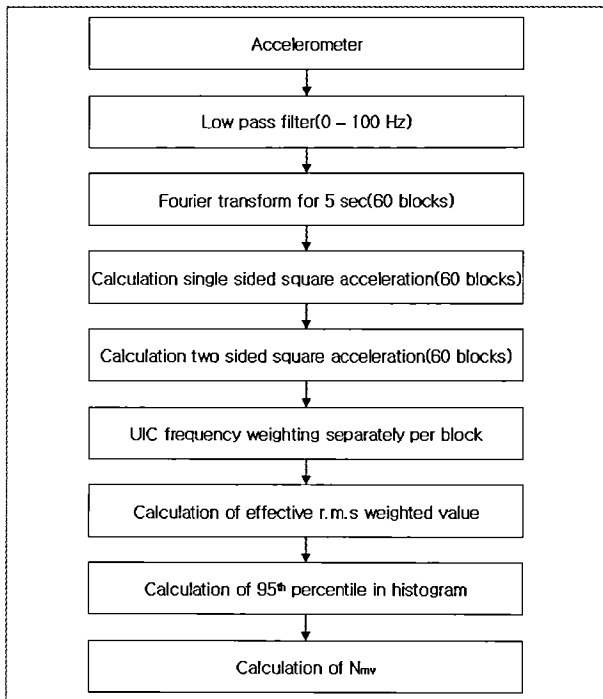


그림 1 UIC 513R 평가기준

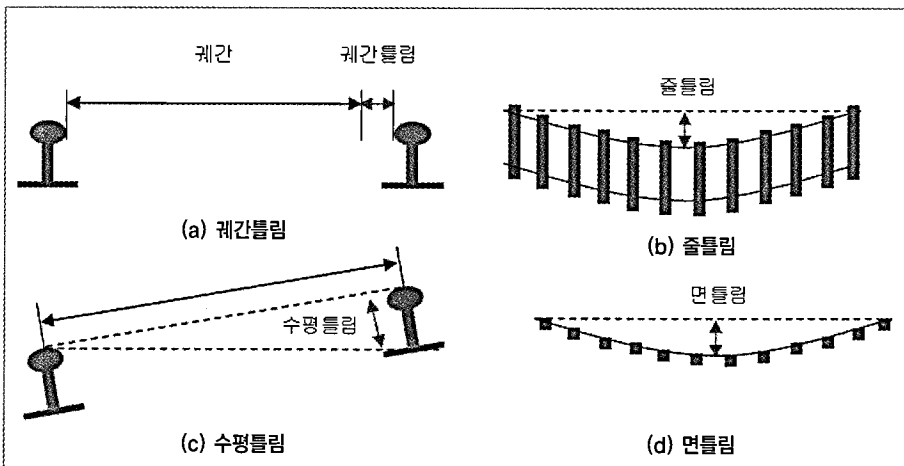


그림 2 레일 불규칙

## 레일 불규칙

철도차량 주행 시 가진원은 차륜/레일(wheel/rail) 접촉, 공력, 판토품, 모터 등 다양한 원인이 있으며, 이중 차륜/레일 접촉은 철도차량 진동의 주요 원인으로 알려져 있다. 차륜/레일 접촉은 차륜/레일의 단면 형상의 고유 특성에 의해 윤축이 좌우로 심하게 흔들리는 현상(hunting)이 발생할 수도 있고, 다량 편성된 열차가 뱀같이 움직이는 사행동(snake motion)을 유발할 수도 있다. 현상 및 사행동 유발은 고속전철에서 최고 주행속도를 결정하는 요인으로서 설계 단계에서 심도있게 검토되어야 한다. 그러나 이는 비선형 동역학(nonlinear dynamics)의 호프분기(Hopf bifurcation) 문제로서 예측하기가 쉽지 않다. 또한 레일은 지반 및 궤도 시공 여하에 따라 상하 방향으로 높낮이가 있으며, 표면 조도(roughness)도 완전할 수는 없다. 좌우 레일은 그림 2와 같이 궤간틀림, 줄틀림, 수평틀림, 면틀림 등의 불규칙이 있게 마련이다. 이러한 레일 불규칙으로 인해 차체는 좌우, 상하 방향으로 불규칙 진동을 일으키고 가진주파수가 대차 및 차체의 고유진동수와 공진을 일으킬 가능성도 있다.

그림 3(a)는 경부고속철도선 중 시험구간으로 사용하고자 하는 서울 기점 195~215km 구간에서의 상하 방향 레일의 불규칙을 나타낸 그림으로서 백색잡음(white noise)으로 보이나, 이를 그림 3(b)와 같이 워터폴 선도(waterfall diagram)로 나타내 보면 주행 속도에 따라 가진주파수 성분이 올라가지만 특정 주파수 영역에서는 가진 성분이 커짐을 볼 수 있다. 따라서 차체 설계 시, 가능한 한 차체의 공진주파수가 가진 성분과 가까이 있지 않도록 설계되어야 할 것이다. 그러나 경량화를 추구하는 고속전철에서 차체 형상이 대체적으로 결정되어 있으므로 공진주파수를 변경하는 것은 쉽지 않은 과제이다. 오히려 감쇠계수를 높

수 영역에서는 가진 성분이 커짐을 볼 수 있다. 따라서 차체 설계 시, 가능한 한 차체의 공진주파수가 가진 성분과 가까이 있지 않도록 설계되어야 할 것이다. 그러나 경량화를 추구하는 고속전철에서 차체 형상이 대체적으로 결정되어 있으므로 공진주파수를 변경하는 것은 쉽지 않은 과제이다. 오히려 감쇠계수를 높

이든가 진동전달효율을 낮춤으로써 진동을 저감시킬 수밖에 없다. 이로 인해 차량 형상이 복잡해지며, 최적의 설계가 되기 위해서는 다양한 전산해석과 실험이 요구되고 있다.

### 현가장치

철도차량 주행

시 차륜-레일, 윤축,

대차로부터 발생된 진동은 윤축과 대차간의 1차 현가장치와 대차와 차량 간의 2차 현가장치를 통하여 차체로 전달된다. 전달된 차체진동은 차량 바닥을 통하여 승객에게 전달되며, 인체의 진동 민감도를 고려하여 승차감이 결정된다. 따라서 승차감을 계산하기 위해서는 먼저 윤축, 대차, 차체의 진동을 계산할 수 있어야 한다. 고속전철 차량의 진동은 ADAMS/Rail, Vampire 등 전용 전산해석 프로그램을 이용하여 해석하게 된다. 그러나 일반적으로 전용 전산해석 프로그램은 모든 경우 완벽할 수는 없다. 특히 고속철도와 같이 고속, 접촉, 대변형 등에 의한 비선형 문제를 포함하고 있는 경우, 그 해의 정확성과 물리적 타당성은 의심될 수밖에 없다. 이를 위해서는 철도차량의 동적응답을 예측할 수 있는 다자유도 비선형 동적 해석모델을 개발하여, 그 응답을 전용 전산해석 프로그램에 의한 결과, 또는 실제 주행 시험 결과와 비교해 보아야 한다. 이 경우 레일과 차륜 접촉에 의한 비선형성을 어떻게 고려하느냐에 따라 그 결과가 크게 달라진다. 따라서 근본적으로는 시제품을 제작하여 대차 주행시험 장치에 의한 시험과 실제 레일 상에서 주행하는 시운전을 통하여 설계 검증이 이루어져야 한다. 또한 이러한 해석 모델을 개발하면 이를 통하여 최적 설계변수를 찾아야 한다. 예로서 단순화된 해석모델 그림 4를 보면 윤축에서 발생된 진동이 대차에 전달되는 과정에서 C1, K1으로 표시되는 축스프링(axle spring)과 대차에서 차체로 전달되는 C2, K2로 표시되는 공기스프링(air spring)의 선택이 중요해진다.

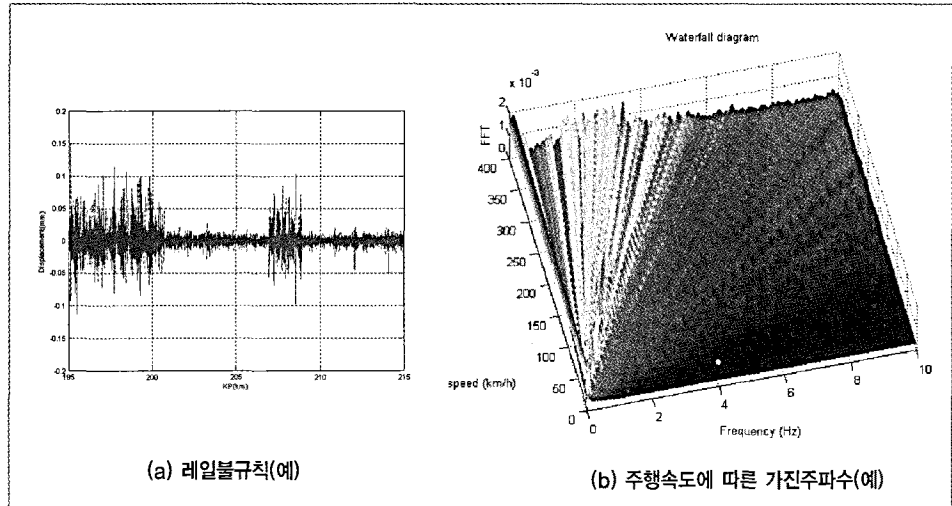


그림 3 차륜/레일 접촉 가진

다. 이를 위해서는 운동방정식을 유도하고 승차감을 최적화하는 최적화 문제를 풀어야 한다. 이 경우 액슬 스프링과 공기 스프링이 비선형 강성과 히스테리시스(hysteresis)와 마찰 기인 비선형 감쇠 특성을 가지고 있어 최적의 설계변수 선정은 결코 쉽지 않은 과제이다. 물론 실제 설계과정에서는 상하 방향 이외에 좌우, 전후 방향 병진 및 회전 운동까지를 고려하여 다양한 설계요소에 대한 최적 설계변수가 도출되어야 한다. 이러한 설계과정은 수동형 현가장치를 적용할 때이다. 그러나 최근 해외 고속전철에서 적용하고 있는 능동형 현가장치(active suspension)도 고려해 볼만하다. 다만 고속 주행에서도 그 응답시간이 짧아 소기의 진동제어를 할 수 있는 제어장치 개발은 쉽지 않은 과제로 예상된다.

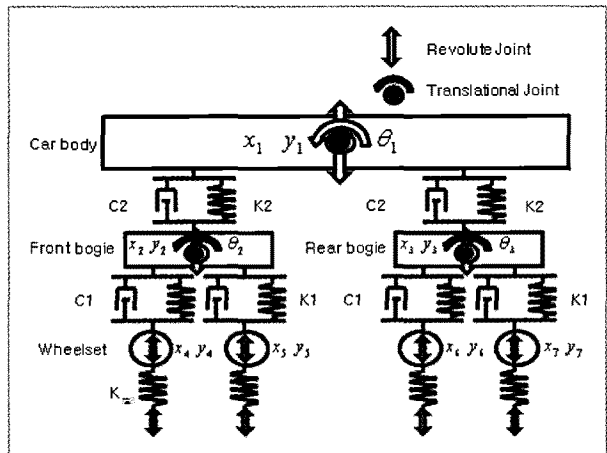


그림 4 철도차량 상하진동 해석모델

## 강체, 유연체 해석

한국형 고속전철 개발 과정에서는 차체를 대차와 스프링, 댐퍼로 연결된 하나의 강체(rigid body)로 보고 주행속도에 따른 차체의 진동을 예측하여 승차감을 평가하였다. 고속철도차량의 승차감을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 차체의 탄성변형을 고려한 유연체(flexible body) 진동해석이 필요하다. 그러나 다양한 재료가 복잡하게 구성된 각각의 부재를 유연체로 모델링하여 전산해석하기에는 컴퓨터 용량도 문제이지만 계산의 정확성도 의문시된다. 특히 알루미늄 압출재는 그 형상이 복잡하여 전산해석이 쉽지 않다. 이러한 문제

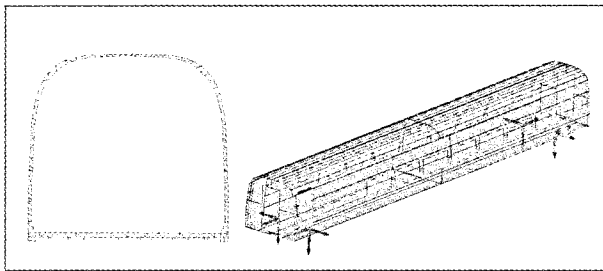


그림 5 유연체 차량 해석모델

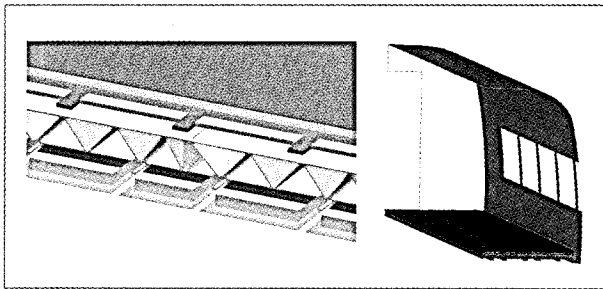


그림 6 복합적층 바닥구조

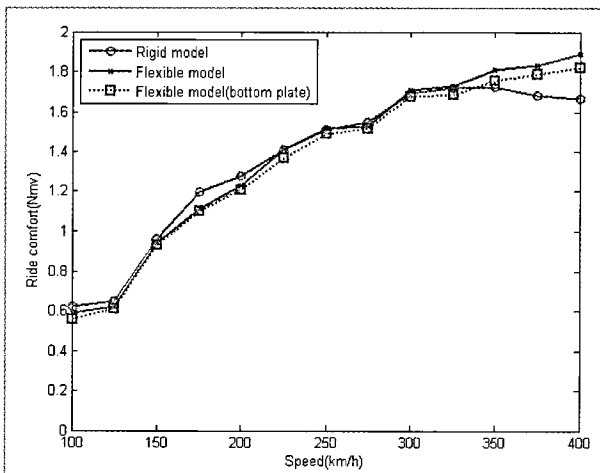


그림 7 해석모델별 승차감 지수

를 해결하기 위해 압출재에 대한 등가물성치를 구하고 압출재를 셸(shell)요소로 치환하면 계산 시간을 단축하면서도 해의 정확성을 높일 수 있다. 그림 5의 유연체 차량 해석모델로부터 차체의 고유진동수와 고유모드를 계산하고 강체모델로부터 계산한 주행 중 대차에서 발생한 진동을 가진원으로 하여 차체의 강제진동을 계산하면 보다 정확한 승차감을 예측할 수 있다.

철도차량 바닥구조는 그림 6과 같이 차체구조물, 합판지지부, 합판으로 구성되어 있다. 구성품 중 차체구조물은 강도를 유지하면서도 경량화가 가능한 알루미늄 압출재를 사용하며, 합판지지부는 연고무(soft rubber), 경고무(hard rubber), 나무(wood) 등으로 합판과 알루미늄 압출재 사이를 연결하게 된다. 알루미늄 압출재의 형상, 합판의 종류 및 두께, 연결재는 진동과 소음 전달을 결정하는 주요 설계변수로서 많은 실험과 경험을 요하는 설계요소이다.

차체 벽면 및 지붕은 알루미늄 압출재와 합판, 그 사이에 유리섬유(glass wool) 등으로 구성되며, 설계 여하에 따라 주행 중 발생하는 외부의 진동과 소음을 차단하는 역할을 하게 된다. 창문 유리는 크기 및 형상에 따라서도 차체의 진동모드에 영향을 주므로 충분한 사전 검토가 필요한 부분이기도 하다.

그림 7은 해석 모델별 UIC 513R 승차감지수를 계산한 결과로서 325km/h 이하에서는 강체모델이나 유연체모델로 계산한 승차감이 거의 유사하나, 350km/h 이상에서 강체모델에 의한 승차감은 속도가 증가함에 따라 오히려 좋아지는 것으로 계산된다. 그러나 유연체모델로 계산하면 속도가 커질수록 승차감이 나빠지는 당연한 결과를 보여주고 있다. 여기에 바닥구조까지 고려하면 실제 승차감은 원래 목표였던 400km/h에서 UIC 513R 승차감지수 1.8을 충족할 수 있음을 보여 주고 있다. 그러나 분산형 고속전철은 각 차량에 모터 및 감속기가 있고, 기타 압축기 등 가진요소를 갖는 기계설비들이 부착되므로 각각에서 발생하는 진동이 승객에게 전달되어 승차감을 저하시키게 된다. 따라서 기계설비로부터 전달되는 진동에 대한 검토가 이루어져야 한다. 또한 곡선구간을 지날 때, 터널 구간, 교량 구간 등에서는 좌우 진동이 커질 것이 예상되므로 각각의 경우에 대한 좌우진동을 계산하여 승차감에 미치는 영향을 검토하고 이를 최소화하는 방안을 도출하여야 할 것이다.