

# 궤도와 궤도구성요소의 동적 특성



## 서사범

(주)서현기술단 부사장  
공학박사 · 철도기술사  
suh7484@hanmail.net

## I. 머리말

모든 접근가능 구조물에 대해 자연현상과 인간의 활동이 시간중속 부담을 주므로 구조물의 동적문제는 공학구조물의 넓은 범위에 걸쳐 심각한 파손과 설계제한으로 귀착된다. 이들 구조물의 분석과 설계는 동적작용의 이해에 기반을 두고 있다. 고유진동수, 감쇄계수 및 상응하는 모드형상과 같은 이들 구조물의 동적파라미터는 동적하중을 받는 구조물의 분석과 설계에 필요한 절차에서 상당히 중요하다. 따라서 각종 음원과 진동원에 관련된 물체의 동적특성과 음향특성을 조사하는 것이 불가피하다.

진동측정의 주된 결과는 일반적으로 고유진동수, 대시포트 값 및 모드형상이다. 명시적인 특성을 제외한 동적강성은 구조물의 진동응답에서 도출하고 평가할 수 있다. 동적시험의 주된 이유는 시험된 시스템에 대해 제안된 분석모델을 그들의 결과가 입증하는 것을 허용하기 때문이다. 입증되어온 분석모델은 큰 확신을 가지고 설계와 응답에 측에 사용할 수 있다. 그것은 '가상실험'으로서 공학실험의 새로운 분야를 형성한다. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션의 구조적 변경은 그 이상의 민감도분석을 수행할 수 있는 반면에 선형거동이든지 비선형거동은 시험을 통하여 확인할 수 있다.

현재, 많은 연구기관이 철도소유자/설계자에게 PC침목, 레일패드 및 기타 궤도구성요소의 동적거동에 관련된 최신지식을 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 기존의 철도구조물을 보다 효율적으로, 특히 보다 비용 효과적으로 사용하도록 만들기 위한 프로젝트가 진행되고 있

다. 그러나 오늘날 정적거동과 동적거동에 관한 제한된 정보는 콘크리트침목과 철도궤도 구성요소와 같은 철도구조물의 분석 및 설계의 방법과 절차가 아직도 과도함을 나타내고 있다. 그들의 경제상의 분석과 설계를 개선하든지 기존의 구조물에서 적절한 용량을 이용하기 위해서는 정적, 동적 및 충격응답에 관하여 보다 좋은 현실적 식견을 갖추어야 한다.

본고에서는 자갈궤도시스템에 관한 모드 테스트(modal testing), 철도궤도-구성요소 진동에 관한 이전의 분석모델과 실험, 현 위치와 현장조건의 실제적 시험방법 등을 소개한다.

## II. 모드 테스트

시험적 모드분석(EMA)이나 모드 테스트는 진동에 대한 구조물의 응답에 기반을 둔 비파괴 시험방법이다. 모드 테스트는 구조물의 동적거동을 이해하는 것을 돕기 위하여 1940년대 이후 널리 사용되어 왔다. 본래의 모드 테스트 기술은 심플 사인 드웰 방법(simple sine dwell method)에 기반을 두었다. 몇 년 후에 고속 푸리에 변환(FFT)에 기반을 둔 혁신적인 방법이 개발되어 오늘날까지 사용되고 있다. 이 모드분석의 방대한 개량은 보다 정확하고 정밀한 진동측정으로 귀착되었다. 게다가 분석모델과 시험결과의 통합은 구조물거동의 민감도분석으로 이끌었다. 시험적 모드분석은 동적문제를 풀거나 구조물을 분석하고 설계하기 위하여 가장 중요한 방법론의 하나로 되었다.

그것은 토목/구조기술자들에게 구조적 동적문제에 관한 실용적인 절차와 신속하고 합리적인 해법을 제공한다.

다수의 조사연구는 모드분석의 관점에서 수행되어 왔으며 모드분석이 비교적 덜 성숙한 경우에도 공학사용에서 실질적인 능률을 나타내었다. 모드 테스트에 포함된 가정은 구조물의 선형성, 시간불변 파라미터 및 측정의 식별 가능성을 포함한다. 일부의 구조물에 대해 선형성이 적용될 수 없을지라도 선형시스템은 힘의 중첩이 적용될 수 있음을 의미하는 것에 주목할 만하다. 게다가 시간불변성질은 어느 기간 동안 모델에서 제외된 인자에 좌우되는 강성과 감쇠와 같은 구조적 파라미터가 일정하게 유지됨을 의미한다. 관찰대상 구조물에 대한 힘과 응답함수가 측정 가능하여야 하긴 하지만, 입력-출력 측정이 구조물의 특성 모델을 만들어내는데 충분한 정보를 가졌을 때에 식별 가능성이 생긴다.

포괄적인 가정에 더하여 구조물을 가진(加振)시킬 때 가정해야 하는 다섯 가지 옵션이 있다. 그들은 가진이 순간력인지의 여부, 백색잡음인지의 여부, 스텝인지의 여부, Wiener-Leavy인지의 여부, 또는 가진이 없는지(자유감쇠나 자유응답)의 여부다. Allemang과 Brown은 시험적 모드분석을 ① 강제정상모드(forced-normal-mode), ② 주파수응답함수, ③ 감쇠복소수지수응답(damped complex exponential response), ④ 수학적 입력-출력모델로 분류하였다.

강제정상모드함수방법은 모드 파라미터를 근사시키기 위하여 다수의 입력을 사용하는 가장 오래된 모드테스트 접근법이지만 진동의 복소수모드를 고려하지 않는다. 주파수응답함수(FRF) 방법은 모드 파라미터를 평가하기 위하여 사용하며 현재 가장 일반적인 방법이다. 그것은 구조물에서 측정되는 자기스펙트럼(auto spectrum)과 상호스펙트럼(cross spectrum)으로부터 계산된 스펙트럼을 포함한다. 감쇠복소수지수응답 방법은 시스템의 자유감쇠(free decay)로부터 얻은 정보를 이용하며, 그것은 초기조건 해제에 의해 만들어진다. 감쇠복소수지수응답 방법의 개발을 통하여 생기는 두 가지 유사한 접근법이 있다. 그들은 Ibrahim 시간영역방법과 Poly 참조접근법이다.

- Ibrahim 시간영역(ITD)방법은 구조물의 모드 파라미터를 확인하기 위하여 임펄스응답함수(IRF)로부터 받은 데이터를 사용한다. 이 접근법은 구조물에 대한

얼마간의 위치에서 동시의 응답측정을 필요로 한다. 그러나 만일 다수의 데이터무리를 입수할 수 없다면 측정에서 일반적인 위치를 선택할 수 있다. 그때 풀러는 고유치 매트릭스를 형성하기 위하여 자유응답데이터의 변위와 가속도 또는 속도가 사용된다.

- Poly 참조접근법은 고유진동수, 모드상수 및 감쇄손실계수를 구하기 위해 다중입력 다중출력 시험으로부터의 FRF데이터를 사용한다. 동시에 측정된 모든 데이터는 모드주파수를 확인하기 위하여 사용된다.

수학적입력-출력모델방법은 입력과 출력응답을 독립적으로 고려한다. 적용은 자유도(dof)의 수에 제한이 없는 시간과 주파수 영역모델 양쪽으로 확장된다. 이 방법론에 기반을 둔 접근법은 자기회귀이동평균(auto-regressive moving average) 접근법과 축소구조매트릭스 접근법이다.

- 자기회귀이동평균 접근법은 다양한 지점에서 얻어진 응답이 구조물에 대해 백색랜덤잡음에 의하여 유발된다는 가진(加振) 가정을 하도록 한다. 2단계 최소제곱이 필요하다. 실제상대와 비교한 각 파라미터의 표준편차비율인 신뢰계수는 통계결과로부터 고유진동수와 감쇄에 대하여 계산할 수 있다.
- 축소구조매트릭스 접근법은 불완전 응답에서 얻어진 축약매트릭스에 기반을 둔다. 그러나 매트릭스가 불완전 모델을 나타내는데 치우쳐있기 때문에 추산된 그것의 해는 유일무이하지 않으며, 주파수범위가 축소된다. 게다가, 매트릭스를 축소하기 위하여 필요한 민감도는 실험오차로부터의 모드(modal)결과의 제한된 정밀성에 기인하여 감소될 것이다. 결과로서 이 방법은 대단히 성공적이지 못하다.

### Ⅲ. 레일패드의 동역학

레일패드는 천연고무나 EVA(ethylene vinyl acetate), 폴리우레탄 등의 고분자 화합물 재료로 만든다. 레일패드는 차축하중(축중)으로부터의 동적응력과 규칙적, 불규칙적 열차운동으로부터의 차륜충격을 줄이기 위하여 레일좌면에 설치한다. 이들의 패드는 레일과 침목 간의 동적 연화(軟化) 때문에 대단히 중요하다. 레일패드의 부적합하거

나 부적당한 사용은 레일좌면에서 침목의 균열문제를 악화시킨다. 게다가, 오용(誤用)은 전체적이고 국지적인 궤도의 큰 침하 및 보다 많은 다짐(tamping)으로부터 도상/노반 파손을 일으킨다. 이 부정적인 영향은 철도시스템의 용량과 보전(保善)으로까지 미칠 수 있으므로 레일패드의 구조적거동을 보다 잘 이해할 필요가 있다.

### 1. 레일패드의 선형모델과 비선형모델

레일패드의 동적거동을 수학적으로 설명하기 위하여 많은 조사연구가 수행되어 왔다. 동적 레일패드 모델은 일반적으로 근본적인 기반을 시간영역이든지 주파수영역에 둔다. 문헌리뷰는 이 모델이 공진주파수와 감쇄와 같은 동적성질을 관련시키므로 대부분이 주파수영역에 관련됨을 나타내었다.

적합한 선형 '유리미분모델(fractional derivative model)'은 Fenander가 개발하였으며, 선형 궤도모델에 적용된다. 이 접근법에서는 레일패드모델이 선형이어야 한다. 다양한 감쇠모델이나 점탄성모델은 예를 들어 손실계수가 주파수에 비례하는 점성모델을 포함한다. 레일패드의 강성이 프리로드(preload)에 비선형적으로 좌우되고 유리미분 모델이 선형이므로 각각의 프리로드에 대해서는 실험데이터에 적합한 파라미터의 다른 집합이 필요하였다. 이 모델은 특히 레일패드의 강성을 시험하는 데에 잘 맞는 것으로 보인다.

Sjoberg는 구성요소 힘으로서 압축작용을 사용하고 프리로드의 영향 및 주파수와 동적진폭 종속을 고려하는 시간영역 모델을 개발하였다. 제안된 모델에는 비선형 형상계수, 네오후크 초(超)탄성(neo-Hookean hyper-elastic) 모델, 유리미분요소 모델 및 Coulomb 강제함수가 포함되었다. 그것은 약간의 파라미터를 사용하는 반면에 합리적으로 측정된 특성을 제공하는 일차원구성요소 모델이다. 그것은 처음에 고무절연체에 대해 제안되었지만 다른 고무구성요소에도 적용할 수 있다.

레일패드의 복잡한 성질이 주파수종속이므로 Knothe 등은 각각의 주파수에 대하여 등가복합강성이 하중진폭과 프리로드에 관련된 쌍(雙)선형함수로 근사계산될 수 있다고 가정하는 주파수영역 모델을 개발하였다. 후자의 가정은 모드 파라미터가 주파수에 선형으로 의존한다는 것이다. 평가된 값은 측정결과와 아주 잘 적합하였다.

### 2. 레일패드의 동적시험

레일패드의 동적시험은 여러 해 동안 관심을 받아왔으며 레일패드의 동적성질을 사정하기 위하여 많은 여러 방법들이 개발되어 왔다. 콘크리트침목, 레일단면 및 여러 가지 유형의 레일패드로 구성되는 레일시스템의 진동에 대한 응답이 측정되었으며 각종 패드가 파형신호에 미치는 영향을 확인하기 위한 일련의 주파수응답함수(FRF)가 발표되었다.

여러 가지 재료와 다른 표면프로파일을 가진 탄성레일패드의 여러 가지 유형이 실험실과 궤도에서 시험되어 왔다. 패드의 평균 감쇄를 나타내었으며 실험실의 결과는 그들이 보수적임을 나타내었다. 그들의 동적강성은 수직하중과 함께 증가하며 하중 처짐 곡선으로부터의 탄젠트(tangent)강성보다 더 크거나 같다. 레일패드 감쇄가 잘 압밀된 자갈궤도의 동적거동에 거의 영향을 미치지 않을지라도 보다 많은 감쇄는 패드자체의 가열을 일으킨다.

Van't Zand는 충격하중시험을 통하여 패드의 동적특성을 측정하고 평가하는 데에 FFT기술을 이용하였다. 곡선일치법(curve fitting method)은 SDOF 운동방정식을 실험결과에 맞추는데 사용되었다. 그것은 400~2,000 Hz의 특정한 주파수에서 수행되었다. 결과는 또 다른 연구와 비교되었는데, 잘 일치하고 있는 것으로 보인다. 이 방법은 그 다음에 도시궤도구조로까지 확장되었다.

Later, Fenander는 완전한 궤도에 대해 실험실 시험장비(rig)로 원형돌기 있는 레일패드의 수직강성과 감쇄를 연구하였다. 강성은 대체로 프리로드와 함께 증가하였지만 주파수에 따라서는 약하게만 증가하였다. 이 조사연구에서 레일패드 동적거동의 유리미분모델이 제시되었다. 2DOF 시험장치는 Verheij가 행한 연구에서 개발되었다. 그것은 두 개의 강제블록으로 구성되며 그들 사이에 설치된 튜브 구성요소를 갖고 있다. 패드의 동적강성을 근사계산하기 위하여 아래쪽 블록을 지지하는 낮은 쪽 스프링의 강성이 무시되었다. 프리로드의 영향이 더 표명되긴 했지만 여러 가지 새로운 패드의 측정은 강성이 주파수와 함께 약간 증가되는 경향이 있음을 나타내었다.

Tompson 등은 2 자유도(2DOF) 시스템의 이론을 적용함으로써 탄성요소의 고주파 동적강성을 측정하는 간접 방법을 개발하였다. 탄성요소는 바닥 위의 두 개의 큰 블록 사이에 설치되었으며 그 중 하나는 그 아래의 소프트한

스프링으로 지지되었다. 탄성요소는 소프트한 스프링보다 훨씬 더 스티프하다고 가정되었다. 측정장치에 두 개의 가진기가 사용되었으며 2DOF 시스템에 대한 약간의 어려움을 줄이도록 약간의 개산(概算)이 이루어졌다. 제안된 이 방법론은 운동방정식을 재정리함으로써 저주파수를 가진 요소로까지 확장될 수 있다. 이 케이스연구의 결과는 신뢰할 수 있는 것으로 보이며 이 근사치를 구하는 접근법이 국제표준에 포함되어가고 있는 것에 주목할 만하다.

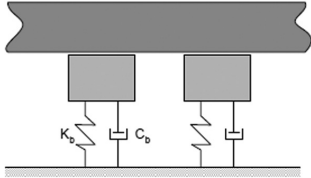

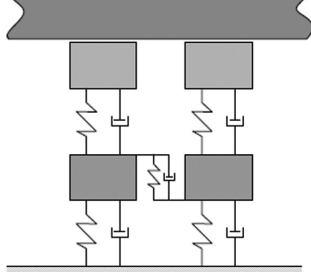
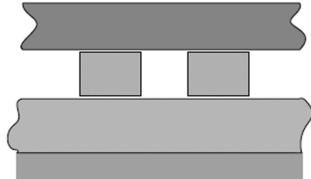
또 하나의 레일패드 시험기는 실험실에서 컨트롤된 조건에서 레일패드의 동적성질을 시험하기 위하여 DOF 관점에 기반을 두고 구성되어왔다. 새 패드와 현 패드는 실험실에서 시험되었다. 그들은 조정된 질량, 프리로딩 스프링과 탄성지지의 장치인 시험기에서 유일한 탄성요소인 것으로 간주한다. 그러나 이 시험기가 사실적인 결과를 주며 레일패드 성질을 사정하는 데에 보다 좋은 방식으로 되는 것에 주목할 만하다.

Knothe 등이 수행한 최근의 조사연구는 탄성고무패드의 측정과 모델링으로 다루어졌다. 준-정적측정과 동적측정은 저주파수(0~40 Hz)와 고주파수(100~2,000 Hz)에서 행하여졌다. 동적시험에서는 세 개의 강판 사이에 두 개의 패드가 설치되었으며 그때 시컨트, 탄젠트 및 등가강성이 도입되었다. 그들은 또한 프리로드와 조화적으로 변화되는 하중의 진폭에 의하게 하였다. 증가하는 프리로드와 감소하는 진폭과 함께 등가강성이 증가한다고 결론지을 수 있다. 이들의 시험은 준-정적 시험에서 고무의 초(超)탄성(hyper-elastic) 작용, 저주파수 주기적 하중 시험에서 고무의 점성-소성작용, 그리고 고주파수대 시험에서 점탄성작용을 나타내었다.

UoW(University of Wollongong)는 SDOF 진동에 대한 응답을 측정하는 것에 기반을 두어 레일패드의 동적성질을 사정하는 대안의 방법을 제안하였다. 이 방법은 평이성과 신뢰성이 있다. 레일패드의 동적강성과 감쇄계수를 정밀하게 평가함에 있어 빠른 비파괴방법인 것으로 입증되었다. 이 방법은 새 유형의 레일패드를 시험할 수 있고 레일패드의 노화가 동적특성에 어떻게 영향을 주는지 평가할 수 있다.

#### IV. 콘크리트침목의 진동

〈표 1〉 단속(斷續) 침목지지 모델

모델	가정
	유형 A - 단속(斷續) 침목지지 - 도상 : 스프링과 댐퍼
	유형 B - 단속(斷續) 침목지지 - 도상과 노반의 반공간(half-space) 모델링
	유형 C - 단속(斷續) 침목지지 - 도상 : 스프링과 댐퍼 - 서로 연결된 도상자갈 질량 - 기반 : 스프링과 댐퍼
	유형 D - 단속(斷續) 침목지지 - 연속 도상층 - 반공간 기반 모델

레일패드를 제외한 콘크리트침목도 이 영역에서 중대한 역할을 수행한다. 콘크리트침목의 동적성질을 다루는 많은 연구가 수행되어 왔으며 특히 모드 테스트가 수행되어 왔다. 자갈궤도는 <표 1>에 나타난 것처럼 단속(斷續)지지 모델의 4개 그룹으로 나눌 수 있다. 침목의 동적강도에 관한 보다 나은 식견을 얻기 위하여 다양한 동적재하에 대한 침목의 응답이 연구되어 왔다. 오스트레일리아 표준(2003)은 재료를 샘플링하고 시험하는 절차를 포함하여 콘크리트침목을 분석하고 설계하기 위한 AS 1085.14를 개발하였다. 그것은 또한 정적, 준-정적 및 동적 주기적 재하를 시험하는 방법 및 침목의 허용한계와 내구성을 포함한다.

모드 테스트는 콘크리트침목의 비파괴 동적시험 방법으로서 50년 이상 동안 매우 중요하였다. Ford는 콘크리



트침목에 대한 모드분석을 수행하였다. 침목은 '프리(free)-프리' 지지를 위하여 각 단부에서 스프링으로 매달려 있다. 단일 지점에서 침목을 가진(加振)하기 위하여 전기역학적 셰이커(electro-dynamic shaker)가 사용되었고, 나머지 지점에서 응답을 측정하는 데에 가속도가 사용되었으며, 그 다음에 일련의 FRF가 얻어졌다. 이 시험에서 모드분석 소프트웨어(SMS 모드)를 사용하여 고유진동수와 상응하는 모드형상이 얻어졌다.

Vincent는 철근콘크리트침목의 모드 테스트와 수치적 모델링을 수행하였다. 그것은 대단히 소프트한 스프링 지지 위에 놓였으며 충격해머 및 다른 하중진폭을 가진 셰이커의 스위프 사인 재하(swept sine loading)로 가진되었다. 여러 유형의 모드 파라미터 도출방법이 사용되었으며 선형거동은 저주파수대에서 일어났지만 더 높은 주파수대에서는 더 적음을 나타내었다. 또한, I-deas는 실험적 결과와 수치적 결과를 비교하기 위하여 3D 선형 유한요소모델을 개발하였다. 그러나 모델은 철근을 제외하고 모드 테스트 결과로 업데이트하는 재료성질을 이용하여 침목 기하구조만을 수용할 수 있다. 이들 결과의 비교는 좋은 일치치를 나타내었다. 민감도분석은 구조적성질을 변경함으로써 행하여졌다.

프리-프리, 노반과의 완전한 연결, 뜬 침목 등과 같은 여러 가지의 경계조건들은 콘크리트침목의 동적거동에 대한 그들의 영향에 관하여 조사되었다. 가진은 횡방향과 수직방향으로 주어졌다. FRF가 얻어졌으며 진동에 대한 그들의 응답에 관한 다양한 경계조건들의 영향을 연구하기 위한 수단으로 되었다. 수치적 조사가 행하여졌으며 침목이 강체(rigid) 빔으로 모델링된 경우에는 결과가 대단히 좋지 않았지만 얇은 층 방법을 사용함으로써 시뮬레이션된 FRF는 주파수가 2,000 Hz까지 이를 때에 측정결과와 아주 좋게 일치하였다. 게다가, 침목에 대한 정하중은 전체 시스템을 스티프하게 하도록 도상과의 밀착을 증가시킨다. 이들의 실험은 Wu와 Thompson이 관찰한 결과를 확인하였다.

## V. 철도궤도의 동역학

Thimoshenko는 1926년에 철도궤도의 동적거동을 처음

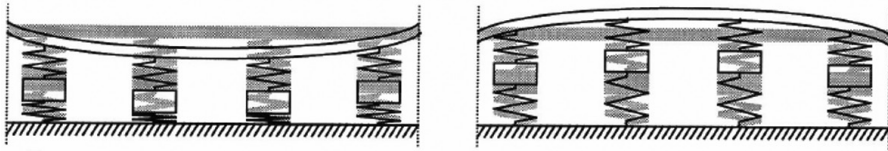
으로 모델화하였다. 이 모델에서 레일은 연속적으로 감쇄된 탄성 Winkler 기초 위에 놓인 무한히 균질한 Euler 보로서 고려되었다. Grassie는 얼마간의 실험에서 관심 있는 주파수대에 두 개의 지배적인 공진만 있다는 것을 발견하였다. 약 100 Hz의 첫 번째 동조모드는 도상 위에서 함께 운동하는 침목과 레일에 상당하는 반면에 레일패드 파라미터에 좌우되는 약 300~500 Hz 사이 주파수의 두 번째의 동조 않는 모드는 도상에 대한 침목 및 레일패드에 대한 레일의 상반진동에 상당한다. 동적모멘트와 충격감쇠가 그 후에 관찰되었다. 탄력 있는 레일패드가 수백 헤르츠에서 콘크리트침목에 대한 동적하중을 충분히 줄일 것이라고 많은 연구로부터 결론지었다. 약간의 레일패드는 콘크리트침목의 동적 힘 변형률을 50% 이상 감소시킨다. 레일패드의 강성은 침목의 변형률을 감소시킴에 있어 침목깊이보다 더 큰 효과를 갖는다.

침목에 대한 동적재하도 또한 연구되었으며 도상자갈이 느슨하게 다져졌을 때 동적하중이 상당히 더 커져가며 탄성패드가 더 적게 효과를 가진다는 점을 나타내었다. Selig와 Waters는 철도궤도의 지반시공기면을 연구하였으며 노반이 궤도강성에 가장 큰 영향을 미치는 하부구조 구성요소의 하나라는 점을 발견하였다. Raymond도 또한 궤도가 더 스티프할수록 더 작은 부등침하나 불균질을 가지며 충격하중을 더 낮게 일으킨다는 것을 발견하였다. Liang과 Zhu는 노반강성이 낮을수록 도상층과 궤도구조의 하부에 대해 더 큰 탄성변형과 더 작은 안정성으로 이끈다는 것을 발견하였다.

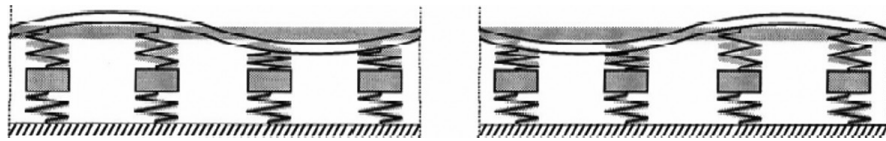
충격해머가 이동식으로서 자체지지이고 교통에 피해를 입히거나 교통을 방해함이 없이 사용될 수 있으므로 대부분은 기구를 설치한 충격해머기구를 이용하여 전체적인 자갈궤도를 사정하는 현 위치시험과 현장시험을 행하였다. FRF 측정은 공진주파수, 감쇄상수 및 상응하는 모드형상과 같은 모드성질을 휴대용 노트북으로 구하여 즉시 뽑아낼 수 있다. 그러나 이들 파라미터는 패드사용 지속기간, 온도 및 프리로드와 같은 인자에 민감하다. 이전의 조사연구를 이하에 요약한다.

### 1. 궤도 거동

동적하중의 영향을 구체화하는 철도궤도모델링은 최근에서야 개발되어왔다. 그러나 궤도 기능저하 및 관련 철



〈그림 1〉 최고조의 궤도 수직공진주파수 모드 형상



〈그림 2〉 레일 공진주파수 모드 형상

도궤도 보수필요에 관해 보다 정밀하게 예측할 수 있게 하는 보다 포괄적인 동적하중모델링이 크게 필요하여왔다. 실제로는 역사적으로 기술적 분석을 수행하는 역학모델로서 유형(有形)의 철도궤도가 채용되어 왔다. 모델이 개별적인 구성요소의 거동을 제외한 전체적인 궤도응답을 합리적으로 예측할 수 있으므로 모델은 오히려 극도로 단순하다.

De Man은 철도궤도구조를 자갈궤도구조, 슬래브궤도구조 및 매립레일구조 등 세 가지 유형으로 분류하였다. 궤도구조의 거동이 구조의 유형(類型)에 강하게 좌우되므로 이 장에서는 자갈궤도유형에 초점을 맞춘다.

대부분의 철도궤도역학모델에서 궤도구성요소는 ① 질량과 관성성질을 가진 구성요소; 레일과 침목, ② 탄성성질을 가진 구성요소; 레일패드, ③ 질량, 관성 및 탄성성질을 가진 구성요소; 도상 등과 같이 그들의 성질에 따라 분류되는 구성요소의 유형으로 시뮬레이션되어 왔다. 자갈궤도구조의 동적응답은 개별적인 구성요소성질, 구성요소들 간의 접촉관계, 구성요소의 물리적 본체 및 동적 하중작용에 따라 크게 다르다.

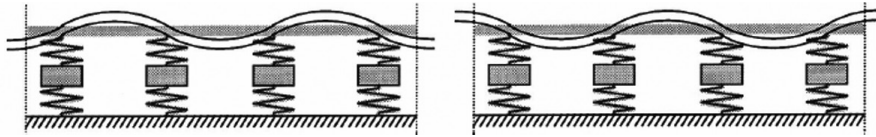
질량과 관성을 가진 레일과 침목은 정적인 중방향 좌굴힘에 대해 궤도안정을 유지시키는 경향이 있다. 탄성성질을 가진 레일패드와 도상은 에너지전달을 약화시키고 동적 힘 빈도를 약화시키며, 그것은 더 낮고 더 적은 유해하중작용으로 귀착된다. 그러나 상태가 좋은 자갈궤도의 레일패드는 침목의 진동을 감쇠시키지 않고 순간하중작용을 약화시키는 사소한 역할을 하는 반면에 레일패드 감쇄

계수가 커질수록 동적 힘을 더 효과적으로 침목에 전달한다는 점에 주목하는 것이 중요하다. 만일 도상감쇄가 잘 압밀된 도상의 전형인 100 kNs/m보다 훨씬 더 크다면 철도궤도의 동적거동은 레일패드감쇄의 영향을 거의 받지 않는다는 것도 발견되었다.

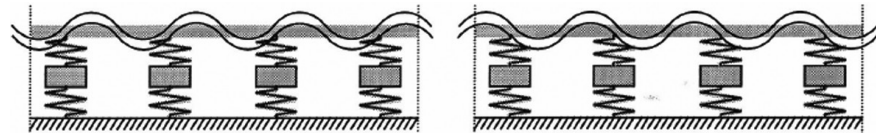
일반적으로, 차량이 철도궤도에 가한 하중은 하중의 면(面)에 상응하여 수직, 횡 및 종 방향의 세 부류로 나눌 수 있다. 궤도구조에 대한 수직하중은 화차의 정적 축중과 이 정적하중에 부가되는 모든 추가의 동적증가(예를 들어, 준-정적, 동적 및 충격)로 구성된다. 이들 동적증가는 흔히 ① 궤도구조의 기하구조(선형) 불규칙(틀림), ② 레일표면의 불규칙, ③ 차륜표면의 불규칙, ④ 차량운전속도, ⑤ 차량 현가장치의 질량특성(스프링상질량 대 스프링下질량)과 같은 다양한 결합요인에 의해 초래된다.

구조적 진동모드의 연쇄는 궤도구조의 물리적 본질 때문에 수직, 횡 및 종 방향에 대한 공진주파수에 좌우되어 존재한다. 궤도구조의 가장 낮게 있음직한 수직 공진주파수는 동조진동과 동조 않는 진동을 포함하는 최고조(full)의 궤도공진(ft)이다. 일반적으로 좋은 조건의 자갈궤도에 대하여 이들 최고조의 궤도 공진주파수는 40과 140 Hz 사이이고, 두 번째 진동모드는 100과 400 Hz 사이이며, 세 번째 수직 진동모드는 250~1,500 Hz이다. <그림 1>은 전형적인 최고조의 궤도진동을 나타낸다.

게다가, 레일이 지지물에 대해 진동하므로 레일 공진주파수(fr)가 존재하며 <그림 2>에 나타난 것처럼 레일패드 성질에 크게 좌우되지만 침목과 도상성질에는 영향을 받



〈그림 3〉 1차 핀-핀 공진주파수 모드 형상



〈그림 4〉 2차 핀-핀 공진주파수 모드 형상

지 않는다.

진동모드와 형상은 침목지간격에 좌우된다. 그 결과로서 보다 적은 굴곡지점을 가진 수직진동(〈그림 2〉 참조)은 다른 것보다 더 성장할 것으로 예상된다. 이들 진동모드는 핀(pin)-핀 공진주파수에 해당되는 소위 '핀-핀' 공진모드이다. 처음의 핀-핀 공진주파수(〈그림 3〉)는 400~1,200 Hz 사이에서 일어나며 두 번째(〈그림 4〉 참조)는 4배 더 높은 주파수보다 약간 적은 주파수에서 일어난다.

Kaewunruen와 Remennikov는 주파수대(저, 중 및 고)가 구조로서의 철도궤도에 대하여 그리고 각 구성요소에 대하여 변화하는 영향을 가진다고 보고하였다. 저주파수대(0~40 Hz)는 하부구조(노반, 보조도상 및 도상)에 대한 손상을 초래하고, 중간주파수대(40~400 Hz)는 레일을 포함하는 상부구조(침목, 레일체결장치 및 레일패드)에 대한 손상을 초래하며, 고주파수대(400~1,500 Hz)는 레일에 대한 손상과 레일체결장치에 대한 변형을 초래한다. 또한, 레일파사마모, 차륜결합(예를 들어, 차륜플랫)이든지 양쪽의 결합은 손상 사이클 프로세스를 일으키는 충격을 통하여 주기적 하중을 발생시킬 수도 있다.

횡방향 불안정은 수직특성과 속도의 함수이다. 레일에 대한 횡력은 대부분 레일두부의 안쪽에 위치한다. 게다가, 횡 비틀림 모드는 고주파수에서 관찰될 수 있다. 궤도구조에 대한 횡력은 ① 운송장비의 곡률, ② 횡방향 불안정의 전개, 또는 ③ 횡방향 궤도틀림에 대한 차량의 응답에 의하여 도입된다. 진동의 면에서 종방향 진동모드는 레일 내의 압축과형으로 가장 좋게 해석된다. 그들은 체결시스템

의 이완을 제외한 레일의 비교적 중요하지 않은 축에서 피로강도에 상당히 영향을 미친다.

궤도 하부구조는 동적 윤택중, 동적 궤도강성 및 궤도 거칠기에 직접 영향을 미친다는 것에 주목하여야 한다. 하부구조 구성요소는 또한 비균질 성질과 대단히 강한 비선형 응력-변형률과 파손관계를 가진다. 그렇기는 하지만, 궤도하부구조의 가장 중요한 임무는 ① 동적하중을 침목에서 지반으로 분산, ② 궤도구조의 지지와 고정, ③ 적합한 배수의 마련, ④ 토질에 대한 혹독한 동상 작용의 감소, ⑤ 궤도시스템에 대한 탄성의 제공 등이다.

Hay는 궤도틀림과 보수비의 대부분이 궤도 하부구조(특히 도상과 노반)에 기인한다는 것을 발견하였다. 이들은 하부구조의 정적거동과 동적거동을 관찰하는 관심사를 제기하므로 많은 이론과 방법이 개발되어왔다. 3축 시험방법은 도상과 노반재료의 동적특성을 얻는 데에 대단히 성공적인 방법이였다. 시험은 복원이나 탄성거동, 소성이나 영구변형률 및 파손응력 레벨과 같은 도상과 노반재료의 근본적인 성질을 확인한다. 이들의 성질은 궤도하부구조의 설계와 유지보수 계획에서 필수적이다.

## 2. 현 위치 동적 시험

Ford는 콘크리트침목, 레일단면 및 레일패드로 이루어진 시스템이 진동에 대해 어떻게 응답하는지를 사정하기 위하여 현 위치(in-situ) 동적시험을 행하였다. 실험실에서는 침목이 콘크리트 바닥 위 나무상자에 들어있는 도상에 매립되었다. 시험은 레일의 상면을 0~1,000 Hz의 주파수



로 가진(加振)하도록 전기-동적 셰이커를 사용하여 행하였다. 레일의 진동주파수는 동일 지점에서 및 레일좌면 근처 세 지점에서 가속도계로 측정하였다.

Sadeghi는 모드 테스트를 수행함으로써 실험실의 개별 콘크리트침목에 대한 시험에서 얻어진 고유주파수가 현 위치 궤도시험베드에서 얻은 것들보다 더 높다는 것을 관찰했다. 이들의 결과는 도상과 노반이 침목 고유주파수의 근소한 감소를 초래하는 것을 나타내었다. 또한, 노반성분이 대단히 강한 비선형 응력-변형률 관계와 불균질 성질을 가졌다는 것을 발견하였다.

Plenge와 Lammering은 세그먼트(segment) 자갈궤도와 궤도구성요소의 동적거동을 측정하기 위하여 실물크기의 실험실시험을 개발하였다. 침목과 도상 간 공극의 영향, 특히 지지되지 않은 침목의 영향이 고려되었다. 두 종류의 뜬 침목은 맴도는(뜬) 단부를 가진 침목과 2쪽이 맴도는 단부를 가진 침목으로 제한되었다. 동적변위는 보통의 가속도계에 더하여 홀로그래픽 간섭계(holographic interferometry)로 측정하였다. 이들 시험의 결과는 이전 기록의 현장데이터와 일치하였다. 그것은 또한 노반에 대한 결합으로부터의 일탈이 동적거동의 현저한 변화로 이끈다는 것도 나타내었다.

현재까지 대단히 적은 조사연구만이 도상과 철도궤도나 침목, 인근 침목 및 레일로 연결된 전체시스템과 같은 궤도구성요소 간의 동적 상호작용에 관한 연구를 수행하여왔다. 그러므로 변화하는 습윤/건조 성질과 정적프리로드와 함께 자갈궤도시스템의 현실적인 공극과 포켓의 다양한 유형을 가진 도상과 침목의 동적상호작용에 관한 다수의 조사연구가 수행되었다.

### 3. 현장 시험

궤도구성요소 동역학을 성공적으로 모델링하기 위하여 필요한 궤도구성요소의 동적 파라미터를 사정함에 있어 산업계가 인정하는 표준방법이 현재 없기 때문에 아무래도 현장(field)시험이 가장 현실적인 것으로 보인다. 산업계는 동적 파라미터와 응답을 조사하는 방법을 갖고 있지 않다. 그 대신에 설계자는 통상적으로 정적재하에 기반을 둔 동적응답을 계산하여 동적재하를 포함하는 계수를 적용한다. 그럼에도 불구하고 이들 시험은 철도궤도 자체의 예상치 못한 문제, 예를 들어 뜬 침목, 레일불순물, 파상마

모, 넓은 패드 등등에 기인하는 비선형성과 뜬 침목 때문에 극히 신뢰할 수 없는 결과로 이끌지도 모른다.

Grassie는 실험실의 데이터와 실제궤도의 데이터 간의 상대적인 상관관계수가 합리적이라는 것을 확인하기 위해 각종 재료(합성고무와 천연고무, 플라스틱 및 합성물)와 표면(평평함, 흠이 있음 및 원형돌기 있음)을 가진 다수의 레일패드의 성질을 조사하였다. 현장의 특정한 패드의 미소한 충격감쇠는 궤도조건 및 동적하중과 준-정적하중의 진폭에 상당히 의지한다. 그것은 충격시험이 궤도성능을 사정하는 데에 좋은 보수적 방법이라는 점을 나타내었다.

De Man 및 De Man과 Esveld는 가진(加振)해머 시험을 이용하여 동적 궤도성질을 사정하는 현장시험을 수행하였다. 이 시험에서는 궤도가 2DOF, 각각 레일과 침목의 두 가지 유효 질량뿐만 아니라 레일패드와 도상-시공기면의 두 가지 대시포트를 나타내는 직접 지지된 연속레일시스템으로 단순화되었다. 궤도의 모드 파라미터는 FRF 측정과 FFT에 기초하여 자동 곡선적합 최적화절차로 도출되었다. 이 시험 예에서 두 개의 공진주파수가 분명하게 얻어졌으며 첫 번째 '핀-핀' 공진은 측정된 FRF에서 인지되었다. Colla 등은 2002년에 무도상 철도궤도의 현장조사를 위하여 몇 가지 기술을 결합하였다. 레이더기술은 층 인터페이스결합 시험, 침목과 노반 간 접촉조건의 감지를 돕는 초음파 및 궤도의 구조적 불균질의 조사에서 필수적인 역할을 하는 충격에코기술에 사용되었다.

그러나 Knothe 등은 현장시험에서 얻어진 값들이 두 번째 공진피크의 주파수대에서만 신뢰할 수 있다고 보고하였다. 이들의 현장측정은 ① 궤도에서 주행하는 열차의 가진을 측정할 수 있을 때, ② 레일을 가진하는 데에 셰이크를 사용할 수 있을 때, ③ 레일을 타격하는 데에 영점 조정된 충격해머를 성공적으로 사용할 수 있을 때에 취할 수 있다.

UoW에서는 자갈궤도시스템의 동적성질을 도출하기 위하여 FFT분석과 모드중첩방법에 기반을 둔 두 개의 2DOF 모델을 개발하여왔다. CRC-Rail 프로젝트는 보통의 열차로 유발된 환경진동에 대한 응답을 기록하였다. 궤도의 동적성질을 도출하는 신호분석이 행하여지고 있으며 보다 정밀한 결과를 조사하는 현장시험이 수행될 것이다.



## VI. 요약 및 맺음말

궤도는 철도인프라스트럭처의 본질적인 부분이며 궤도의 구성요소는 상부구조와 하부구조로 나뉜다. 레일, 레일패드, 콘크리트침목 및 체결시스템과 같이 대부분 식별할 수 있는 부분은 상부구조라고 부르는 반면에 하부구조는 도상, 보조도상 및 노반으로 구성되는 지질공학적 시스템에 관련된다. 궤도와 궤도구성요소의 동적시험은 특히 콘크리트침목과 레일패드에 관심이 있다. 본고에서는 모드 테스트 기술을 소개하고, 궤도구성요소의 진동에 대한 이전의 분석모델과 시험을 소개하였으며, 현장시험과 현 위치 시험에 사용된 실제적인 시험을 강조하였다.

레일패드는 규칙적인 열차운동과 불규칙적인 열차운동으로 생기는 충격과 차륜충격으로부터의 응력을 줄이기 위하여 통상적으로 레일좌면에 설치한다. 레일패드는 궤도와 침목 간의 상호작용을 완화시키기 때문에 대단히 중요하다. 레일패드의 몇몇 시간영역과 주파수영역 모델링 뿐만 아니라 레일패드의 동적파라미터에 관한 다수의 시험이 행하여져 왔다.

콘크리트침목의 동적성질을 다룬 약간의 조사연구를 본고에서 소개하였다. 대부분은 실험적 모드 테스트 기술에 기반을 둔다. 게다가, 노반과 뜬 침목에 완전히 결합된 프리(free)-프리와 같은 침목의 다양한 경계조건은 콘크리트침목의 동적거동에 관한 경계조건에 영향을 연구하기 위하여 조사되었다. 그러나 여전히 약간의 제한조건이 남아있다.

오늘날까지 도상과 궤도 간 또는 침목, 인근 침목과 같은 궤도구성요소와 레일궤도로 연결된 전체시스템 간의 동적 상호작용을 연구함에 있어 대단히 적은 조사연구만이 수행되어왔다. 게다가, 비록 현장시험이 현실적인 것으로 보일지라도 뜬 침목, 레일불순물, 파상마모, 낡은 패드에 기인하는 비선형 및 뜬 침목과 같은 예상치 못한 많은

궤도문제 때문에 극히 신뢰할 수 없는 결과로 이끌 수도 있다. ☹

### ♣ 참고문헌

- [ 1 ] De Man, A.P. and Esveld, C. Recording, estimating and managing the dynamic behaviour of railway structures, Proceedings of the International Seminar on Modal Analysis, The Netherlands. 2001,
- [ 2 ] AP De Man, DYNATRACK: A survey of dynamic railway track properties and their quality, Delft University of Technology, The Netherlands. 2002,
- [ 3 ] 서사범 ; 최신 철도선로(Modern Railway Track : Esveld C. 원저), 도서출판(주) 열과 알, 2003.5. (ISBN 89-5529-067-5)
- [ 4 ] Randall J. Allemang, Modal Analysis - Where Do We Go From Here? U.S.A.
- [ 5 ] Esveld, C., A. W. M. Kok, and A. De Man. Integrated numerical and experimental research of railway track structures, Proceedings of the 4th International Workshop on Design Theories and their Verification of Concrete slabs for Pavements and Railroads, Portugal. 1998.
- [ 6 ] Ewins, D. J. Basics and state-of-the-art of modal testing. Sadhana, 2000.
- [ 7 ] Grassie, S. L. Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009.
- [ 8 ] Sun, Yan Quan, and Manicka Dhanasekar. A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system, International Journal of Solids and Structures, 2002.
- [ 9 ] Remennikov, Alexander, and Sakdirat Kaewunruen., Experimental investigation on dynamic railway sleeper/ballast interaction, Experimental Mechanics, 2006.
- [ 10 ] Kaewunruen, Sakdirat, and Alexander Remennikov, Integrated field measurements and track simulations for condition assessment of railway track, 2005.
- [ 11 ] Kerokoski\_Olli et al, Structural behaviour and failure mechanisms of concrete monoblock railway sleepers, 2011.
- [ 12 ] Indraratna, Buddhima, D. Ionescu, and H. D. Christie. Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests, Journal of geotechnical and geoenvironmental Engineering, 1998.
- [ 13 ] Remennikov, Alexander, Sakdirat Kaewunruen, and Karl Ikaunieks. Deterioration of dynamic rail pad characteristics, 2006.