

# 철도차량과 궤도의 상호작용에 따른 궤도침하와 동적거동의 시뮬레이션모델 및 횡방향 궤도틀림



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

## 1 머리말

철도 인프라스트럭처 예산의 대부분은 유지보수에 사용된다. 오늘날은 열차속도와 용량이 증가됨에 따라 선로점유시간이 감소되고 유지보수 활동의 시간대가 크게 제한되어져가고 있다. 그러므로 궤도틀림진행의 메커니즘을 이해하고 적합한 유지보수전략을 수립하는 데에 더 많은 노력을 필요로 한다. 철도시스템의 생애주기비용을 줄이고 새로운 궤도구조를 설계하도록 하게 하기 위해서는 궤도틀림진행의 메커니즘을 이해하는 것이 중요하며 궤도틀림의 성장을 예측할 수 있어야 한다. 수직궤도틀림의 발달을 예측하기 위하여 여러 가지의 궤도침하모델이 개발되어 왔다. 그러나 횡방향 궤도틀림의 성장에 관한 연구는 그리 많지 않다.

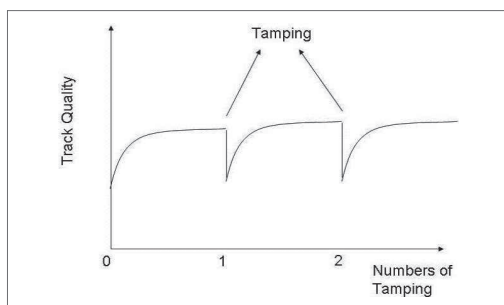
본고에서는 궤도침하를 더 잘 이해하도록 하게 하기 위해 실험에 의거한 수직궤도침하모델을 고찰하고(제2장), 철도궤도의 동적거동을 시뮬레이션하는 모델을 설명하며(제3장), 횡방향 궤도틀림에 관련된 연구를 리뷰(제4장)한다.

## 2 궤도침하모델

궤도틀림이 주로 불규칙궤도침하에 기인한다는 점과 레일의 휨 강성, 도상과 노반의 변형 및 초기 궤도선형틀림이 불규칙궤도침하에 영향을 미친다는 점은 잘 알려져 있다. 궤도침하는 도상의 압밀과 노반의 비탄성거동에 밀접하게 관련된다. 도상은 개개 도상자갈 간의 마찰과 전단력을 통하여 하중을 노반으로 전달한다. 각양각색의 궤도강성과 도상두께는 불규칙도상침하를 초래한다. 노반의 침하는 레일이음매 아래에서 발생되며 도상이나 노반자체의 불규칙한 강성에 기인한다.

궤도침하는 일반적으로 두 단계가 있다. 첫 번째는 다짐(tamping) 직후의 급속한 침하의 기간이다. 그 후에는 그림 1에 나타낸 것처럼 느린 침하가 일어난다.

적합한 침하모델을 개발하기 위해서는 궤도침하의 메커니즘을 이해하는 것이 중요하다.



[그림 1] 궤도침하 과정

### 1.1 Sato의 궤도침하 모델

Sato는 수많은 재하사이클을 받아 다져진 궤도의 침하를 다음과 같이 나타낼 수 있다고 주장하였다.

$$y = \tau(1 - e^{-\alpha x}) + \beta x \quad (1)$$

여기서,  $y$ : 침하 [mm],  $x$ : 궤도로 수송된 하중의 반복수나 통과톤수,  $\tau$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ : 계수 이 방정식에서는 두 단계의 궤도침하가 고려된다. 방정식의 첫 번째 부분  $\tau(1 - e^{-\alpha x})$ 은 다짐 직후 궤도의 초기침하를 나타내며,  $\beta x$ 는 장기침하를 나타낸다. 파라미터  $\alpha$ 는 초기침하의 속도를 나타내며  $\tau$ 는 침하의 심하기 정도를 나타낸다. Sato는 파라미터  $\beta$ 가 반복재하의 속도, 도상오염의 양, 침목압력 및 수직도상가속도와 같은 몇 가지 인자에 좌우된다는 점을 설명하였다. 이상적으로 말하면, 침하를 최소화하기 위해서는 파라미터  $\beta$ 가 작아야 한다. 그러므로  $\beta$ 에 영향을 주는 인

자의 변경은 설계프로세스에서 유용할 수 있다.

Sato는 또한 궤도틀림진행의 속도를 다음과 같이 정의하였다.

$$D = L \times M \times N \quad (2)$$

$L$ 은 축중, 차량계수 및 속도의 영향이며 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$L = \sum 2Q_i \times C_i \times v_i \quad (3)$$

여기서,  $2Q_i$ : 정적 축중 [kN],  $C_i$ : 차량계수,  $v_i$ : 속도 [m/s]

$C_i$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$C_1 = \frac{1}{1 - \xi \eta} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{M_b}{m} \quad (5)$$

여기서,  $\xi$ : 차량 현가장치의 스프링특성을 나타내는 계수(화차에 대하여 0.5, 객차에 대하여 0.9),  $M_b$ : 스프링 상 질량 [kg],  $m$ : 스프링 하 질량 [kg]

$M$ 은 최대 침목압력, 최대 도상가속도 및 충격계수에 비례하는 궤도구조계수이다.

$$M = P_b \times \ddot{y} \times s \quad (6)$$

$$M = \frac{P_b \sqrt{k_1}}{\sqrt{mEI}k} \quad (7)$$

여기서,  $P_b$ : 침목에 대한 최대하중 [kN],  $\ddot{y}$ : 최대 도상가속도 [ $m/s^2$ ],  $s$ : 충격계수,  $k_1$ : 레일과 침목 간의 스프링계수,  $E$ : 레일강의 탄성계수 [ $N/m^2$ ],  $I$ : 레일의 단면2차모멘트 [ $m^4$ ],  $k$ : 레일 지지길이당의 강성 [kN/mm]

$N$ 은 레일, 침목, 도상 및 하층토의 불규칙 또는 도상오염의 정도이다.

궤도틀림성장의 모델은 Sato가 제시했으며, 다음과 같이 5개 인자의 영향을 받는다.

$$S = 2.09 \times 10^{-3} T^{0.31} V^{0.98} M^{1.1} L^{0.21} P^{0.26} \quad (8)$$

여기서,  $S$  : 평균 궤도틀림성장속도 [mm/100  
 일],  $T$  : 통과톤수 [100만 톤/년],  $V$  : 평  
 균속도 [km/h],  $M$  : 구조계수,  $L$  : 장대  
 레일 또는 이음매레일의 영향계수(장대레  
 일에 대하여 1, 이음매레일에 대하여 10),  
 $P$  : 노반에 대한 영향계수(양호에 대하여  
 1, 불량에 대하여 10)

궤도틀림의 성장은 주행속도와 반복재하에 비  
 례함을 알 수 있다. 궤도구조의 개량은 궤도틀림  
 성장을 효율적으로 줄일 수 있다.

## 2.2 Frohling의 궤도침하 모델

Frohling은 동적운하중 및 궤도지지조건과 관  
 련하여 각양각색의 궤도침하를 분석하였다. 동적  
 침하모델의 방법론을 그림 2에 나타낸다.

$N$ 하중교번 후의 침하  $e_N$  [mm]은 식 (9)와 같  
 이 정의된다.

$$e_N = \left[ \left\{ k_1 + k_2 \left( \frac{k_{2ml}}{k_3} \right) \right\} \times \frac{P_{dyn}}{P_{ref}} \right]^w \times \log N \quad (9)$$

여기서,  $k_{2ml}$  : 압밀단계 후에 측정된 개개 침목  
 의 평균 궤도강성 [N/m],  $k_1 \sim k_3$  : 상수인  
 자,  $P_{dyn}$  : 동적운하중 [kN],  $P_{ref}$  : 참조  
 운하중 [kN],  $N$  : 하중사이클의 수,  $w$  :  
 궤도침하의 계수

누적된 도상열화의 프로세스는 특정 침목에서  
 주기적 재하의 조합을 확인하는 데에 사용할 수  
 있다. 그러나 이 모델에서는 도상침하만이 고려되  
 며 도상열화는 고려되지 않는다.

## 2.3 Shenton의 궤도침하 모델

Shenton은 궤도열화, 동적 힘, 레일 불규칙, 침  
 목간격, 침목지지, 도상침하 및 하부구조에 관련  
 된 몇 가지 주요 인자를 조사 연구하였다. 또한,  
 $N$ 하중 사이클 후에 침하를 예측하기 위한 수치  
 적 침하모델을 개발하였다.

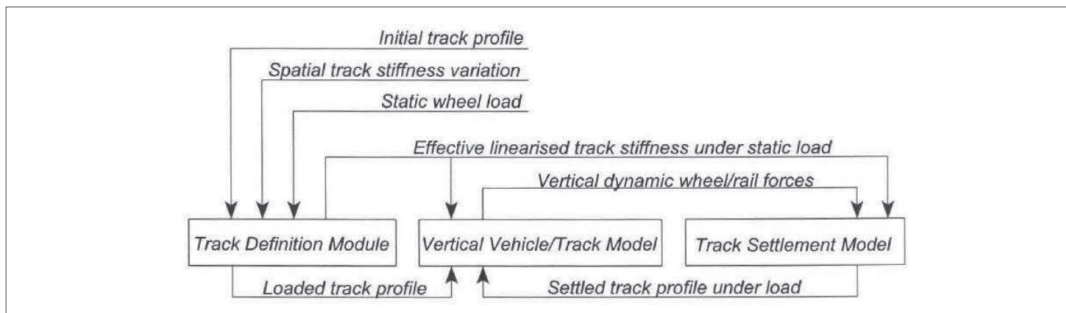
$$e_N = K \frac{F_e}{10 \{ (0.69 + 0.028h) \sqrt[5]{N} + 2.7 \times 10^{-6} N \}} \quad (10)$$

여기서,  $K$  : 궤도구조계수(영국의 궤도에서는  
 $K = 1$ 이 전형적이다),  $F_e$  : 등가운하중  
 [t],  $h$  : 리프팅 값 [mm]

등가운하중은 높은 윤축하중이 침하에서 지배  
 적이라는 사실을 고려하는 식 (11)로 계산된다.  
 그것은 각양각색의 축중  $F_i$ 에 대하여 보다 합리  
 적인 모델을 보장한다.

$$F_e = \sqrt[5]{ \frac{\sum_{i=1}^s F_i^5 N_i}{\sum_{i=1}^s N_i} } \quad (11)$$

Dahlberg에 따르면 식 (9)는 다음과 같이 단순



[그림 2] 상호작용 동적침하 방법론

화할 수 있다.

$$e_N = K_1 N^{0.2} + K_2 N \quad (12)$$

Shenton은 침하모델에서 하중 사이클의 수를 고려하였다. 계수  $K_1$ 과  $K_2$ 는 주요 인자에 좌우되며, 두 번째 항은 하중 사이클의 수  $N$ 이  $10^6$ 보다 클 경우에 한해서만 중요해져 간다. 이 모델은 침하와 하중사이클 수 사이의 관계를 강조한다.

## 2.4 ORE의 궤도침하 연구

Alva-Huratado와 Selig가 수행한 ORE(Office for Research and Experiment of the International Union of Railways, UJC)의 연구에 따르면, 동일한 하중사이클 후의 도상스트레인  $e_N$ [mm]은 식 (13)으로 계산할 수 있다.

$$e_N = e_1 \times (1 + b \times \log N) \quad (13)$$

여기서,  $N$  : 하중사이클의 수,  $b$  : 상수(개개의 침묵에 대하여 약 0.2, 궤광에 대하여 약 0.43),  $e_1$  : 최초 하중사이클 후의 침하 [mm]

ORE 궤도침하모델에서 특정기간의 운전하중  $T$ 후의 침하는 식 (14)로 묘사된다.

$$E_T = a_1 + a_0 \times \log \left( \frac{T}{2 \times 10^6} \right) \quad (14)$$

여기서,  $a_0$ ,  $a_1$  : 선로의 품질에 좌우되는 침하계수,  $T$  : 기간의 운전하중 [t]

이 모델도 Sato의 모델과 마찬가지로 두 부분으로 구성된다. 즉, 다짐직후의 최초부분  $e_1$  및 교통량에 따른 궤도침하를 나타내는 두 번째 부분  $e_1 \cdot b \cdot \log N$ . 그러나 Lonescu 등이 수행한 오스트레일리아의 연구는 ORE 궤도침하모델이 큰 수의 하중사이클 하에서는 부정확하다는 점을 나타내었다. 큰 수의 하중사이클 하에서의 궤도침

하는 다음과 같다.

$$e_N = e_1 N^b \quad (15)$$

여기서,  $b$  : 실험에 의거한 계수

연구의 결론은 높은 축중이나 높은 동적운하중을 가진 열차가 궤도침하를 증가시킨다는 것이다.

## 2.5 Ford의 궤도침하모델

ORE 연구에서 하나의 제한은 동일한 재하란 전제조건이 있다는 점이다. Ford는 변화하는 하중사이클을 조사 연구하기 위하여 식 (13)을 수정하였다.  $e_1$  은 적용된 응력  $\Delta q$ 와 파손응력  $q_f$ 에 대한 곡선인  $e_1'$ 로 재정의된다.  $N$ 에 대한 새로운 값, 즉  $N_e$ 는 식 (13)을 도치시킴으로써 결정된다.

$$N_e = 10^{\frac{\left(\frac{e_N}{e_1} - 1\right)}{b}} \quad (16)$$

여기서,  $e_1'$  : 새로운 하중에 상응하는 초기의 영구스트레인,  $e$  : 영구스트레인의 현재 값  
그러므로 도상침하는 식 (17)로 결정된다.

$$E_N = e_1' \{1 + b \log(N_e + 1)\} \quad (17)$$

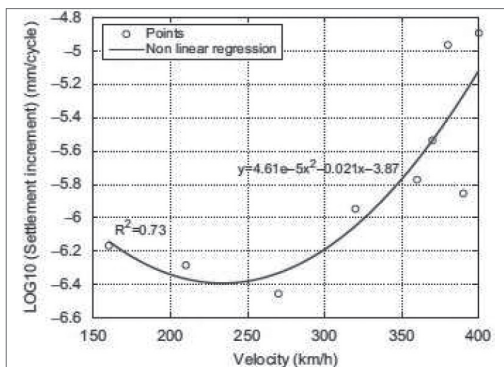
장기침하는 Sato의 모델과는 다르게 대수적으로 성장한다. 이 모델에는 몇 가지의 제한이 있다. 모델링프로세스에서 약간의 가정은 절대적으로 유효하지 않다. 도상의 구속압력과 도상파손은 일정하다고 가정되며 그러므로 도상응력은 도상층 전체에 걸쳐 일정하다고 가정된다.

## 2.6 SI Shaer의 궤도침하 연구

SI Shaer 등은 침하를 시험결과에 의거한 높은 하중속도에서의 가속도에 관련지으려고 했다. 축소된 스케일의 자갈궤도는 세 침묵으로 나타내며, 문자 M의 형상을 갖는 신호를 마련하는 세 개의 유압잭을 이용하여 재하시킨다. 그러나 이동하중은

다양한 롤링속도에서 시뮬레이션했으며 하중속도와 침하증가 간의 관계를 [그림 3]에 나타낸다.

더욱이, 침하에 기인한 표준편차의 증가와 상향과 하향의 평균 침목가속도의 관계를 시뮬레이트 하였으며, 그들 간에 선형관계가 구해졌다. 그러나 선형관계는 속도가 360 km/h 이하일 때만 정확하다.



[그림 3] 속도와 침하증가 간의 관계

### 2.7 Gao와 Zhai의 궤도침하모델

Gao와 Zhai는 차량-궤도결합 진동모델과 궤도침하모델을 결합함으로써 궤도침하를 조사 연구하였다. 동적응답과 궤도틀림은 [그림 4]에 나타난 것처럼 모델에 대한 피드백으로서 취해진다.

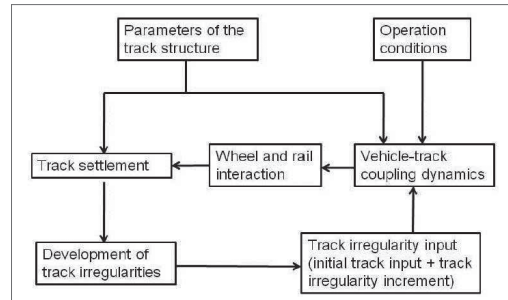
수치적 궤도침하모델을 식 (18)과 (19)에 나타낸다.

$$e_t = \sum_{i=1}^N e_{bi} \quad (18)$$

$$e_{bi} = c_1(\sigma_b - c_2)^2 c_{ba} \quad (19)$$

여기서,  $c_t$  : 궤도침하 [mm],  $e_{bi}$  :  $i$  하중사이클 하에서의 궤도침하 [mm],  $N$  : 하중사이클의 수,  $c_1$ 와  $c_2$  : 실험적 계수,  $c_{ba}$  : 도상가속도 [ $m/s^2$ ],  $\sigma_b$  : 도상응력 [ $N/m^2$ ]

연구에서는 차량동역학과 동적궤도성능 간의 상호작용이 고려되었다. 궤도구조의 여러 가지 유형과 운영적 인자는 이 모델의 입력으로 사용할 수 있다. 차량과 레일의 표면거칠기는 궤도침하의 거동에 강한 영향을 미친다는 점이 발견되었다.



[그림 4] 궤도침하의 연구방법

### 2.8 BRR(영국철도연구소)의 궤도 수직틀림진행 연구

BRR이 수행한 궤도틀림진행 연구에서는 궤도 선형틀림진행에 대한 궤도강성변화의 영향이 확인되었다. 궤도선형틀림진행에 대한 다수의 기본적인 기여는 ① 용접 패임에 대한 스프링 하 질량 응답에 기인하는 동적 힘과 그 결과에 따른 궤도 품질, ② 일반적인 궤도 거칠기에 대한 스프링 하 질량 응답에 기인하는 동적 힘과 그 결과에 따른 궤도품질, ③ 일반적인 궤도 거칠기에 대한 차체 응답에 기인하는 궤도품질 등을 예측하기 위하여 결정되어 왔다.

이들의 세 양상은 총 궤도 SD를 계산하기 위하여 함께 결합되며, 방정식을 이하에 나타낸다.

$$\text{총궤도 } SD = (a^2 + b^2 + c^2)^{1/2} \quad (20)$$

여기서,  $a$  : 용접 패임에 대한 스프링 하 질량 응답에 기인하는 궤도 SD,  $b$  : 일반적 궤도 거칠기에 대한 스프링 하 질량 응답에 기

인하는 궤도 SD,  $c$  : 일반적 궤도 거칠기에 대한 차체응답에 기인하는 궤도 SD

그러나 궤도선형 모델에서 도출된 방정식은 아직 더 이상 입증되지 않고 있다. 게다가, 모델은 Eurobalt 프로젝트의 일부로서 제한된 수의 시험 케이스를 해석하는 데만 사용되었다.

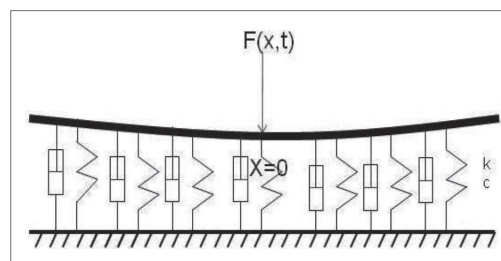
### 3 궤도시스템모델

궤도시스템동역학은 광범위하게 연구되어 왔으며 설계와 유지보수 목적으로 다양한 수학적 모델이 개발되어 왔다. 대부분의 궤도모델은 궤도시스템이 단독의 차륜 또는 2윤축을 가진 단독의 대차로 가진(加振)된다고 가정한다. 궤도시스템은 주파수영역이든지 거리영역으로 가장 일반적으로 모델화된다. 공간영역방법은 궤도를 따른 고정점에서 궤도를 가진시키기 위하여 가변주파수를 사용하는 반면에, 거리영역방법은 특정시간 동안 궤도를 따라 적용된 가변적으로 이동하는 하중을 사용한다. 대부분의 공간영역 궤도연구는 무한의 Euler-Bernoulli와 Timoshenko 보 모델에 의거한다. 레일의 진동거동을 시뮬레이션하는 방법에는 일반적으로 두 가지 방법, 즉 유한요소분석(FEA)과 진동모드방법(Vibration modal method)이 있다. 진동모드방법은 자유도(DOF)의 수, 따라서 계산시간을 효과적으로 줄이는 반면에 FEA는 궤도시스템의 비선형인자를 다루기에 더 좋다. 궤도모델은 또한 연속지지 위나 단속(斷續)지지 위에 놓인 레일로 분류한다.

#### 3.1 BOEF 모델

탄성기초 위의 보(BOEF) 모델은 상대적으로 단순한 보 모델이며, 궤도기초계수는 실험적 시험에

의거한다. BOEF는 궤도거동에 대하여 레일레벨에서 고려하지만, 레일 아래의 궤도기초는 기초계수로서 지나치게 단순화된다. 그러므로 BOEF 모델은 궤도 횡방향 운동 모델링에 대하여 이상적이지 않다. [그림 5]는 철도궤도시스템을 묘사하는 초기모델을 나타내며, 여기서 무한의 보는 탄성기초로 연속적으로 지지된다. BOEF모델은 4차 편미분방정식(PDE)으로 묘사된다. 이것은 침목과 도상의 동적거동을 무시하는 단순한 모델이며 침목에서의 단속지지도 또한 단순화된다. 모델은 궤도시스템의 기본적인 동역학을 이해하는데 유용하며 또한 약간의 저주파 동적문제를 풀 수 있다.



[그림 5] 궤도운동 모델

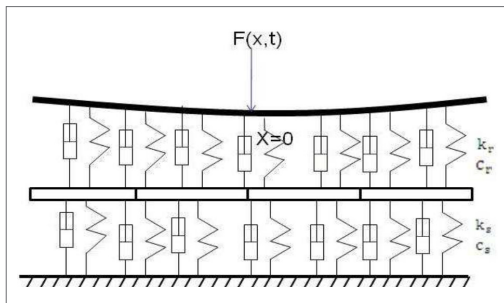
#### 3.2 다층(多層)탄성모델

BOEF모델에 근거하여 다층탄성모델(layered elastic model)을 사용할 수 있으며, 이 모델은 보다 현실적인 동적거동을 나타낸다. 다층탄성모델은 대체로 정적궤도시스템모델이며 궤도 각 층의 평균계수를 사용하여 각 궤도시스템 층들에서의 압력분포를 구할 수 있다.

다층탄성모델[그림 6]에서 레일에 대해서는 4차 PDE를 정립할 수 있으며 각각의 궤도지지층에 대해서는 2차 PDE를 정립할 수 있다. BOEF와 다층탄성모델 양쪽에 대하여 궤도의 진동거동을 분석할 수 있지만, 이동하중과 각 궤도하부시스템

들 간 인터페이스의 비선형거동을 이들 모델에 추가하기가 어렵다.

유한요소(FE)모델과 다층탄성모델 양쪽은 준정적 궤도시스템모델이다. 다층탄성모델에서는 궤도 각 층의 평균계수가 사용되며, 각 궤도시스템 층들에서의 압력분포를 구할 수 있다.



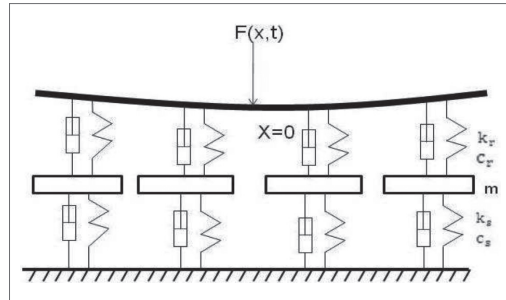
[그림 6] 2층 탄성 궤도모델

### 3.3 단속(斷續)지지 궤도 모델

BOEF와 다층탄성모델은 모두 레일이 연속적으로 지지된다고 가정하지만, 실제로는 궤도가 단속(斷續)으로 지지된다. 따라서 [그림 7]과 같은 단속지지모델이 개발되어 왔다.

단속지지 궤도모델을 묘사하고 푸는 데에는 유한요소분석(FEA)과 모드분석(modal analysis) 등 2가지 방법이 널리 사용된다. 진동모드분석은 자유도(DOF)의 수, 따라서 계산시간을 효과적으로 줄이는 반면에 FE모델은 궤도시스템의 비선형 인자를 다루기에 더 좋다. VAMPIRE와 SIMPACK 등과 같은 진보된 차량동역학 분석틀이 존재한다. 이들 차량동역학패키지는 궤도검측차(TRC)로 얻은 궤도선형데이터를 사용할 수 있다. 그러나 이 틀은 궤도층의 재하를 시뮬레이트하거나 수직과 횡방향 궤도강성의 전형적인 변화를 용이하게 고려할 수 없다. 게다가, 이들 소프트웨어시스템은 다층(multiple layer)궤도모델 및

인접 차축 아래 궤도요소들 간의 상대적인 힘 연결을 고려하지 않는다.



[그림 7] 2층 단속(斷續)지지 궤도모델

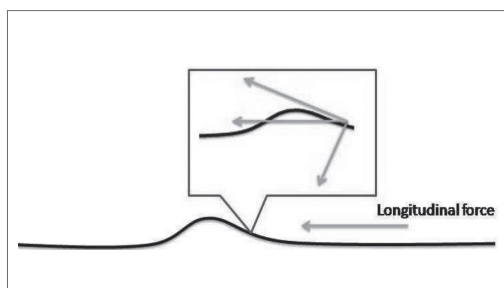
## 4 횡방향 궤도틀림 연구

궤도의 횡방향 안정성은 안전과 승차감을 확보함에 있어 핵심 요구조건이다. 궤도의 횡방향 이동과 좌굴은 심각한 주행안정성문제 또는 탈선조차 일으킬 수 있다. 그러므로 동적운하중 하에서 궤도 횡방향 운동의 메커니즘을 확인하는 것이 중요하다. 횡방향 변위저항은 궤도를 안정시킴에 있어 본질적인 역할을 하며, 이 저항은 침목의 횡방향 지지, 무응력 온도, 이음매조건, 침목과 도상 간의 마찰 및 다짐효과 등에 주로 영향을 받는다.

궤도의 횡방향 변위는 수직변위와는 다르게 수직력, 횡력 및 종방향 힘(축력)의 영향을 받는다. 만일 수직력이 크다면 도상과 침목 간의 저항이 크다. 그러므로 L/V하중비율은 궤도의 횡방향 이동에 대한 크리티컬 파라미터이다. 종방향 힘은 [그림 8]에 나타난 것처럼 궤도 들림(uptift)으로 이끌거나 횡방향 틀림을 가한다. 흑색 선은 레일을 나타내며 오렌지색 선은 종방향 힘 및 이 힘을 궤도를 따른 힘과 궤도에 수직인 힘으로 분해한

것을 나타낸다.

동하중 사이클에 의한 횡방향 궤도틀림의 전개에 관한 연구는 많지 않다. 궤도좌굴연구가 뒤따르는 모델이 프랑스에서 개발되었다.



[그림 8] 종방향 힘의 영향을 받은 초기 횡방향 틀림

### 4.1 Prud'homme 연구

횡방향 궤도틀림에 관한 초기연구의 하나는 Prud'homme이 수행하였으며, 이동하는 횡방향 하중 하에서의 목침목 궤도의 횡방향 저항력이 실험적으로 평가되었다. 횡방향 하중이 매일의 궤도 재하차량(TLV) 통과 후에 증가되었지만 수직하중은 여전히 일정하였다. 목침목 궤도의 횡 저항력에 관한 최초의 실험식이 개발되었으며 식 (21)에 나타낸다.

$$L_p = 10 + \frac{V}{3} \quad (21)$$

여기서,  $L_p$ : 궤도의 횡 저항력 [kN],  $V$ : 수직 축중 [kN]

Prud'homme한계는 횡방향 궤도운동을 연구하는데 좋은 가이드라인을 제공하지만 곡률과 레일온도하중 영향과 같은 약간의 중요 인자가 이 식에서는 고려되지 않았다. 식 (21)은 다음과 같이 레일온도, 궤도곡률, 궤도강성 및 레일 프로파일 성질을 반영하도록 개량되었다.

$$L_p = \rho \left( 10 + \frac{V}{3} \right) \quad (22)$$

$$\rho = \left[ 1 - 0.125AT \left( 1 + \frac{800}{R} \right) \right] \left( \frac{K_v}{2 \cdot 10^7} \right)^{1/8} \cdot 0.225 \frac{(EI_{XX})^{1/4}}{(EI_{ZZ})^{1/8}} \quad (23)$$

여기서,  $R$ : 곡선반경 [m],  $T$ : 중위온도 초과 레일온도 [°C],  $EI_{XX}$ : 양 레일의 횡방향 휨 강성 [Nm<sup>2</sup>],  $EI_{ZZ}$ : 양 레일의 수직 휨 강성 [Nm<sup>2</sup>],  $A$ : 레일단면적 [m<sup>2</sup>],  $K_v$ : 궤도의 기초계수 [N/m<sup>2</sup>]

### 4.2 Kabo의 횡 저항력 연구

Prud'homme의 연구 후에는 각종 영향인자에 대한 수직방향과 횡방향 재하 하의 도상저항력을 연구하기 위하여 3차원 FE모델이 개발되었다. 침목은 콘크리트의 재료적 성질을 가진 탄성체로 모델링되며 도상은 비선형 경화와 압밀을 고려하는 입자재료의 탄소성 구성요소의 연속체모델을 사용하여 모델링된다. 각종 수직하중에 대하여 도상 어깨의 4가지 다른 선형이 분석되어 왔으며, 도상 어깨의 확장이나 어깨높이의 증가가 횡 저항력을 상당히 증가시킬 수 있다는 점을 나타내었다.

결과는 도상압밀이 증가됨에 따라 단독의 콘크리트침목에 대한 최대 횡 도상저항력이 5 kN에서 18 kN으로 변화됨을 나타내었다. 결과는 또한 열화는 노반강성에 밀접하게 관련되지 않는 반면에 도상상층은 최대응력을 겪으며 침하에 대해 선도적인 기여자라는 점을 나타내었다.

### 4.3 Southampton 대학의 횡방향 슬라이딩 궤도저항력 연구

철도궤도의 저항력은 Prud'homme이 정의한



횡 저항력보다 더 복잡하다. Southampton 대학교의 최근의 연구에서는 침목저면, 침목측면 및 침목단면 등 도상과 침목 간의 3 접촉영역이 분석되었다. 침목저면 연구는 기능저하 시의 수직하중, 횡방향 하중 및 모멘트 하중의 실험적 관계에 의거한다.

저면저항력의 최대지지력은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$V_{max} = N_{\gamma} s_{\gamma} (0.5\gamma B - \Delta u) BL \quad (24)$$

여기서

$$\begin{cases} N_q = K_p e^{\pi \tan \phi} \\ K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \\ N_r = (N_p - 1) \tan(1.4\phi') \\ s_{\gamma} = 1 + 0.1 K_p \left( \frac{B}{L} \right) \end{cases} \quad (25)$$

여기서,  $N_q$  : 지지력계수,  $N_{\gamma}$  : Meyerhof 공식으로 구한 지지력계수에 상사(相似),  $K_p$  : 수동압력계수,  $s_{\gamma}$  : Meyerhof 공식으로부터의 형상계수,  $\phi'$  : 유효 전단저항력의 각도 [rad],  $B$  : 기초 폭 [m],  $L$  : 기초 길이 [m],  $\gamma$  : 도상의 단위용적중량 [kN/m<sup>3</sup>],  $u$  : 공극수압

측면저항력은 다음 식을 이용하여 사정할 수 있다.

$$R_{crib} = (s-b) l \gamma h' \tan \phi' \quad (26)$$

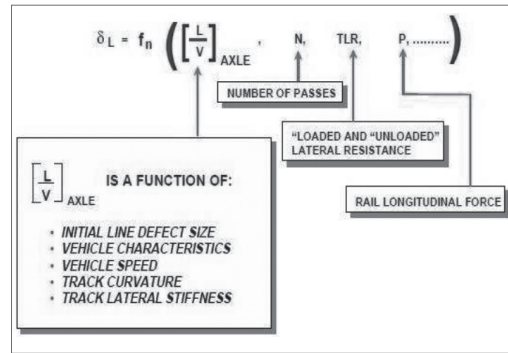
여기서,  $s$  : 침목간격 또는 도상에 대한 안정 경사 각 [rad],  $b$  : 궤도방향의 침목 폭 [m],  $l$  : 침목길이 [m]

도상어깨 시험결과는 ERRI(UIC의 유럽철도연구소) 보고서, ORE(UIC의 舊연구·시험소) 보고서 및 Kabo의 연구에 필적되고 일치한다고 간주되었다. 어깨 폭의 변화는 횡방향 변위의 특정범위에 걸쳐 횡 저항력에 크게 영향을 줄 수 있다는 점을 나타내었다. 도상에 대한 전단저항력의 유효

각도를 정량화하기 어렵기 때문에 어깨 저항력을 계산하는 데에는 넓은 범위의 불확실성이 있다.

#### 4.4 SNCF 연구

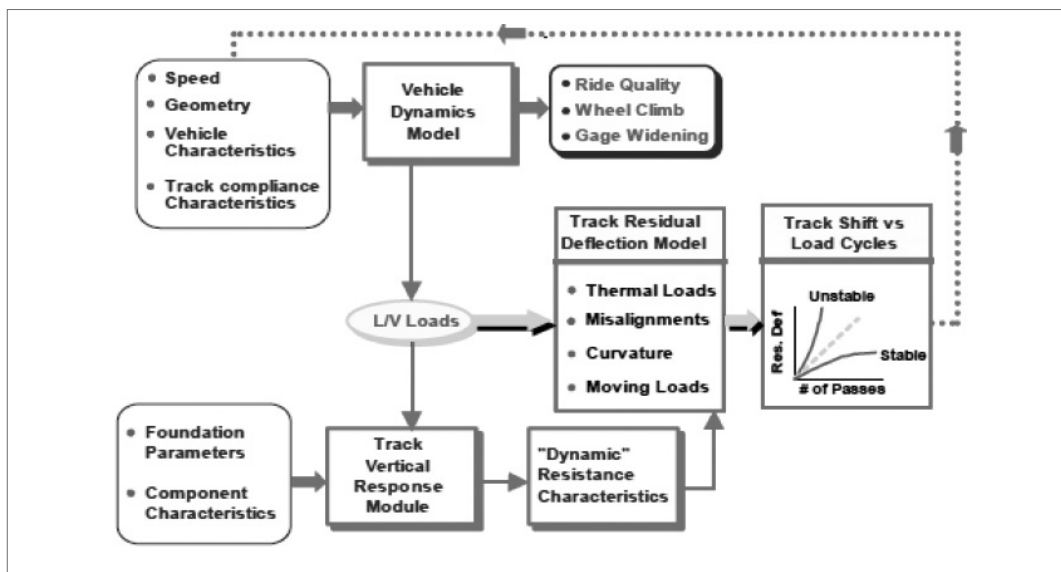
Kish, Samavedam 등은 횡방향 궤도틀림성장의 메커니즘을 연구하고 횡방향 궤도이동을 예측하는 모델을 개발하였다. [그림 9]에 나타난 것처럼 궤도이동분석에 사용된 파라미터는 차량특성, 레일질량, 수직과 횡방향 축중, 레일온도하중, 궤도곡률 등등이다.



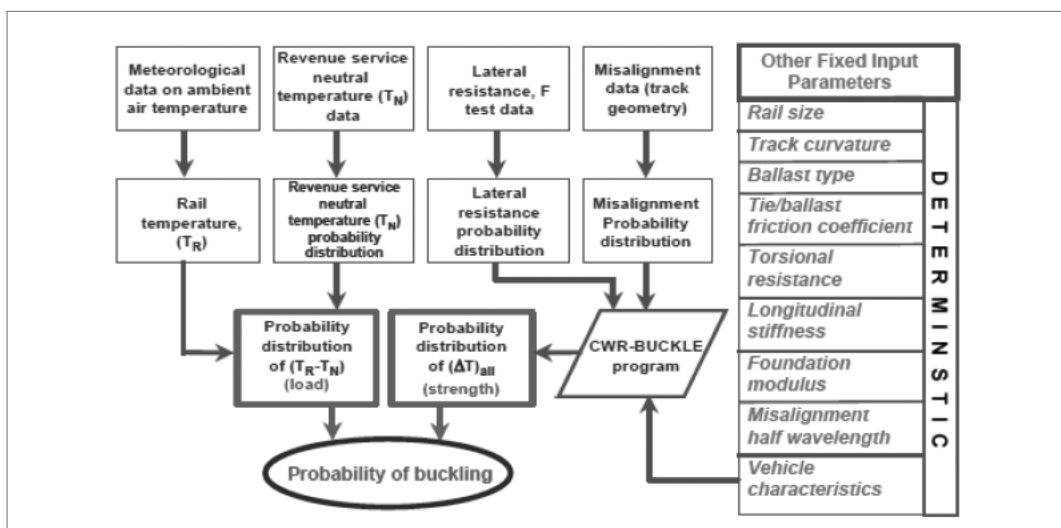
[그림 9] 궤도 횡방향 이동 파라미터

문제를 분석하기 위하여 궤도잔류 힘 모델과 수직 동역학모델 등 두 개의 기초적 모델을 결합하였다(그림 10). 궤도잔류 힘 모델에서는 궤도가 비선형 탄소성 특성의 스프링 위의 보로서 고려되며, 이동하는 횡방향 하중은 준정적으로 특성화된다. 차량동역학모델은 차량 올라타를 보다 정밀하게 평가하는 OMNISIM 코드를 이용한다.

확인결과는 모델이 특정한 수의 TLV 통과범위 내에서 횡방향 궤도틀림을 상대적으로 정확하게 예측할 수 있다는 것을 나타내었다. 이때 궤도곡률, 온도(열적 힘), 횡 저항력, 침목-도상 마찰, 횡방향 실(實) 차축하중 및 통과 수 등과 같은 횡방향 궤도이동에 대한 몇몇 인자의 영향이 분석된



[그림 10] 모델링 접근법



[그림 11] 궤도좌굴 분석 접근법

다. 탄성 힘과 안정된 잔류 힘에 관하여는 2개의 한계가 사정된다. 이들의 한계는 Prud'homme 이 목침목 궤도에 기초하여 사정한 한계와 비교하여 현대적 콘크리트침목 궤도에 더 적합하다.

#### 4.5 궤도좌굴연구

Kish와 Samavedam은 소정의 궤도에 대한 좌

굴의 가능성을 예측하기 위하여 궤도좌굴의 발달을 분석하였다. 연구에서는 횡 저항력과 초기 횡 변위 등 2개의 기본적인 궤도파라미터가 사용되었다. 비틀림 저항력, 종 저항력, 동적차량하중 등과 같이 궤도좌굴에 보다 적게 영향을 미치는 몇 가지의 파라미터들도 또한 고려된다. 하중과 궤도 구조의 강도는 궤도좌굴 성장프로세스에서 온도

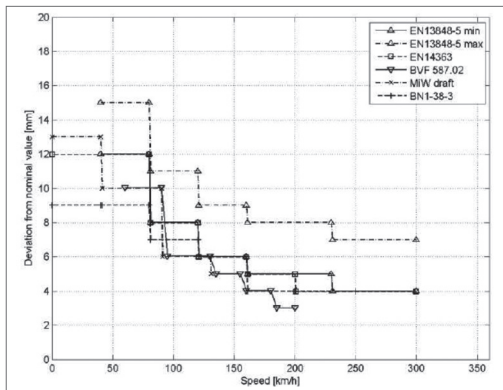
로 환산하여 나타낸다.

전체의 접근법을 그림 11에 나타낸다.

그러나 이 모델은 궤도를 따라 불균등하게 분포된 도상저항력, 있어야 할 곳에 없는 침목과 레일 체결장치, 궤간변화 및 두 레일 간의 다른 증위온도 등의 영향을 고려하지 않는다. Lim과 Sung은 더 많은 영향인자를 고려하는 보다 정밀한 3차원 궤도좌굴모델을 개발하였다.

## 5 현대의 규정

횡방향 궤도틀림의 한계는 각종의 열차속도에 좌우되며, 그림 12는 각종 기준(표준)에 따라 3 m에서 25 m까지의 파장을 가진 횡방향 틀림의 최대치를 나타낸다.



[그림 12] 여러 가지 속도에 대한 횡방향 궤도틀림 한계

횡방향 변위에 대한 저항력(RLD)은 좌굴에 견디어내는 궤도선형안정성에서 중요한 횡방향 궤도틀림에 대한 저항력의 값이다.

Prud'homme 공식의 다른 형태들은 많은 국가에서 차량허용기준으로 사용된다. 그러나 그것은 횡방향 궤도이동의 메커니즘을 묘사하기 위하여 지나치게 단순화되었다고 간주된다. 게다가, 시험이 목침목과 경량레일단면을 가진 궤도에 기초한 반면에 궤도시스템과 교통시나리오는 특히 콘크리트침목의 개발로 상당히 바뀌었다.

고속열차에 대한 선형틀림한도와 하중한계에 관한 현행의 SNCF 실험은 최근의 SNCF 논문에 주어져 있다. 이 논문에서는 운전이 영향을 받으면서 안전이 잠재적으로 위태로운 크리티컬 줄(방향)틀림을 20~40 m의 파장범위에 대해 12 mm 피크-피크 값으로 나타낸다. 보수 전의 최대 허용 줄(방향)틀림은 보다 작아야 한다. 자갈궤도의 콘크리트침목은 최대 횡 저항력이 13.3~17.8 [kN/침목]이어야 한다.

미국연방철도청(FRA)이 한정된 현행의 미국고속기준은 여러 가지 수직축중에 대하여 약 0.5의 L/V하중비율을 나타낸다. 그것은 Prud'homme이 제시한 값보다 더 큰 허용치를 준다. 게다가, 이 한계는 [표 1]에 나타낸 것처럼 수직하중의 변화에 따라서도 바뀐다.

[표 1] 제안된 실(實)차축 L/V 한계

V [kN]	L/V 한계	
	L/V=0.28+4.46/V {줄(방향)틀림 없음}	L/V=0.28+4.46/V {줄(방향)틀림 있음}
89	0.50	0.48
133	0.43	0.41
178	0.39	0.38
245	0.36	0.35

## 6 맺음말

궤도틀림발달 배후의 메커니즘을 이해하는 것은 중요하며, 수직궤도틀림을 모델링하기 위하여 많은 연구가 수행되어왔다. 각종 침하모델의 비교 연구는 모델들 간에 상당한 차이가 있다는 점을 나타내었으며 적합한 모델을 선택하기 위해서는 다양한 파라미터를 고려할 필요가 있다. 대부분의 수치적 모델은 실험적이며 똑같은 실험에 의거한다. 그러나 횡방향 궤도틀림의 성장은 이 영역의 조사연구가 거의 없기 때문에 잘 이해되지 않고 있다. 현대의 규정은 대부분이 Prud'homme 한

계에 의거하며, 이 한계는 L/V 하중비율과 정적 횡 저항력을 포함하는 두 부분을 가진 단순함수이다. 이 모델은 단지 실(實)L/V비율과 횡 저항력보다는 동적 영향을 고려함으로써 개량될 수도 있다. 여러 가지 속도에 대한 횡방향 궤도틀림의 크기에 대한 한계는 영향을 미치는 많은 타 인자를 여전히 고려함이 없이 정의된다. 이들의 모든 한계는 유지보수의 관점에서는 유효하지 않을지도 모르며, 특정 철도선로를 정확하게 예측함으로써 증가될 수 있다.

## 참고문헌

- Christiansen, Lasse Engbo, and Hans True. "On the dynamics of railway vehicles on tracks with lateral irregularities." 12th Miniconference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies. 2012.
- Duda, Sławomir. "Simulation of railway vehicle motion on the straight track." Journal of KONES 17, 2010.
- Dahlberg, Tore. "Railway track settlements-a literature review." Report for the EU project SUPERTRACK. Division of Solid Mechanics, IKP. Linköping University. Linköping, Sweden, 2003.
- Holtendorff, Kira, and Ulf Gerstberger. "Predicting Settlements of Ballasted Tracks due to Voided Sleepers." WCRR, Koeln, Nov 25, 2001.
- Puzavac, Lepasava, Zdenka Popović, and Luka Lazarević. "Influence of track stiffness on track behaviour under vertical load." PROMET-Traffic & Transportation, 2012.
- Shi, Xiaoyi. Prediction of permanent deformation in railway track. Diss. School of Civil Engineering, the University of Nottingham, UK, 2009.
- Ferreira, Luis, and Martin H. Murray. "Modelling rail track deterioration and maintenance: current practices and future needs." Transport Reviews, 1997.
- Salim, Md Wadud. Deformation and degradation aspects of ballast and constitutive modelling under cyclic loading. Diss. Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2004.
- Nguyen Gia, Khanh, José María Goicolea Ruigómez, and Felipe Gabaldón Castillo. "Dynamic effect of high speed railway traffic loads on the ballast track settlement", 2011.
- Suiker, Akke Simon Johanna. The Mechanical Behaviour of Ballasted Railroad Tracks. TU Delft, Delft University of Technology, 2002.
- 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.
- Le Pen, Louis. Track behaviour: The importance of the sleeper to ballast interface. Diss. University of Southampton, 2008.
- Esveld, Coenraad. "Improved knowledge of CWR track." Interactive Conference on Cost Effectiveness and Safety Aspects of Railway Track, UIC/ERRI, 1998.
- Kish, Andrew, and Gopal Samavedam. "Risk analysis based CWR track buckling safety evaluation", 2001.
- Kish, Andrew, Gopal Samavedam, and D. N. Wormley. New track shift safety limits for high-speed rail applications. John A. Volpe National Transportation Systems Center, 2007.
- 서사범 : 개정3판 선로공학(궤도역학, 궤도재료, 궤도의 설계와 관리, 보안·운전, 소음·진동), 도서출판BG 북 갤러리, 2012.8. (ISBN 978-89-6945-037-1 93530)