

궤도시스템의 횡탄성에 따른 곡선부 레일의 동적거동평가

A Dynamic Behavior Evaluation of the Curved Rail according to Lateral Spring Stiffness of Track System

김박진* 최정열** 천대성*** 엄 맥*** 강윤석**** 박용걸*****
Kim, Bag Jin Choi, Jung Youl Chun, Dae Sung Eom, Mac Kang, Yun Suk Park, Yong Gul

ABSTRACT

Domestic or international existing researches regarding rail damage factors are focused on laying, vehicle conditions, driving speed and driving habits and overlook characteristics of track structure (elasticity, maintenance etc). Also in ballast track, as there is no special lateral spring stiffness of track also called as ballast lateral resistance in concrete track, generally, existing study shows concrete track has 2 time shorter life cycle for rail replacement than ballast track due to abrasion. As a result of domestic concrete track design and operation performance review, concrete track elasticity is lower than track elasticity of ballast track resulting higher damage on rail and tracks. Generally, concrete track has advantage in track elasticity adjustment than ballast track and in case of Europe, in concrete track design, it is recommended to have same or higher performance range of vertical elastic stiffness of ballast track but domestically or internationally review on lateral spring stiffness of track is very minimal. Therefore, through analysis of service line track on site measurement and analysis on performance of maintenance, in this research, dynamic characteristic behaviors of commonly used ballast and concrete track are studied to infer elasticity of service line track and experimentally prove effects of track lateral spring stiffness that influence curved rail damage as well as correlation between track elasticity by track system and rail damage to propose importance of appropriate elastic stiffness level for concrete and ballast track.

key words : curved rail, track stiffness, field test, lateral spring stiffness

요 지

곡선부 열차주행시 궤도에 작용하는 횡압은 궤도 변형과 차량손상 및 유지보수 비용 증가를 초래하며 특히 곡선부 레일의 편마모 및 열화손상에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 국내외적으로 이러한 레일손상에 미치는 여러요인에 대한 기존의 연구는 선형, 차량조건, 운전속도 및 운전습관 등에 집중되어 있으며 궤도구조의 특성(탄성력, 유지관리 등)에 관한 것은 간과하고 있는 실정이다. 또한 자갈도상 궤도구조에서 도상 횡저항력이라 부르는 궤도의 횡탄성이 콘크리트 궤도에서는 특별히 없기 때문에 일반적으로 콘크리트 궤도구조가 자갈도상 궤도보다 마모로 인한 레일 교체주기가 약 2배 짧은 것으로 기존의 연구결과 나타났으며, 국내 콘크리트 궤도 설계 및 운영 실적 검토결과 콘크리트 궤도의 궤도탄성력이 자갈도상보다 부족하여 레일 및 궤도 손상을 가중 시키고 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 콘크리트 궤도는 자갈도상 궤도에 비해 궤도의 탄성조정이 유리하며 유럽의 경우 콘크리트 궤도 설계 시 자갈도상의 수직 탄성력 범위와 동등이상의 성능확보를 권고하고 있으나 국내외적으로 궤도의 횡탄성에 대한 검토는 미약한 수준이다. 따라서 본 연구에서는 운행선 궤도에서의 현장측정 및 유지관리실적 분석을 통해 공용중인 자갈도상 및 콘크리트 궤도의 동적거동 특성을 파악하여 운행선 궤도의 탄성력을 유추하고 궤도시스템별 궤도 탄성력과 레일 손상과의 상관관계 및 곡선부 레일 손상에 미치는 궤도 횡탄성의 영향을 실험적으로 입증하여 콘크리트 궤도의 적정 탄성 수준 및 자갈도상 궤도의 도상탄성 확보의 중요성을 제시하고자 한다.

주요어 : 곡선부, 궤도강성, 현장측정, 횡탄성

- * 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 서울메트로 철도토목팀 차장, 정회원
E-mail : oskweon@kdc.co.kr
** (주)대한콘설타트 철도부 궤도팀 사원, 공학석사, 정회원
*** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 학생회원
**** 한국철도기술연구원 철도구조물연구팀 팀장, 정회원
***** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사, 정회원

1. 서론

곡선선로에서 발생하는 차륜 플랜지와 레일 게이지면사이의 과대마모는 오랫동안 많은 연구자들에 의해 연구되고 있는 중요한 문제이다. 차륜 플랜지와 레일 게이지면 사이의 과대마모는 차륜/레일의 삭정 및 교체주기 감소, 차량성능 저하, 차량/궤도간 상호작용력 증가, 차륜/궤도 손상 증가 등을 유발하여 차량의 주행안전성을 저해하고 유지보수 비용의 증가를 가져오므로 이를 최소화하기 위한 연구가 절실하다. 그러나 현재까지 레일마모와 궤도탄성의 상호작용 연구에 대한 연구는 거의 전무한 실정이므로 이 분야에 대한 보다 체계적이고 적극적인 관심이 요구된다. 레일의 마모는 선로조건, 직선 및 곡선, 궤도의 탄성범위 등에 따라 차륜과 레일이 접촉위치, 접촉압력 및 접촉빈도에 따라 마모되는 부위가 차이가 나타난다. 도시철도 대부분의 구간은 급곡선이 많으며 이에 따라 궤도틀림 및 궤도변형이 발생하고 레일측면에서는 다양한 형태의 마모가 발생한다. 또한 궤도구조의 형식 및 특성에 따라 궤도각부의 부담력 및 레일마모경향이 상이하게 나타난다. 따라서 이러한 레일마모의 경향 파악을 위해서는 운행선 궤도구조의 거동특성을 정확히 이해하는 노력이 필요하다. 궤도구조는 크게 강성부재와 탄성부재로 나눌 수 있으며 연직방향 및 횡방향 거동특성이 각기 다르게 작용한다. 연직방향 강성 및 탄성만을 고려하여 횡방향 강성 및 탄성의 효과를 간과한다면 곡선부 궤도의 궤도부담력 및 레일마모를 효과적으로 예방하고 관리하기에 어려움이 따를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 도시철도 선로 중 곡선반경이 동일하며 궤도구조의 형식이 각기 다른 3개소에서의 현장측정을 바탕으로 각각의 궤도의 거동특성을 파악하고 연직방향 및 횡방향 탄성력의 범위를 산정하여, 이론적 계산치와 비교분석하고자 한다. 또한 측정 및 해석결과를 바탕으로 도출한 궤도거동특성과 해당구간에 대한 레일유지관리 이력과의 상관관계를 파악하고자 한다.

2. 차륜/레일 상대변위와 마모에 대한 기존의 연구동향[3]

고속선 및 기존선 궤도/차륜의 상대변위 및 마모에 관한 기존의 연구결과는 Fig. 1~Fig. 2와 같이 고속선 주행시는 차륜과 레일이 횡변위 +5~-5mm사이에서 접촉하며 기존선 주행시는 곡선방향에 따라 횡변위 +18~-18mm사이에서 접촉하고 있는 것으로 나타났다.

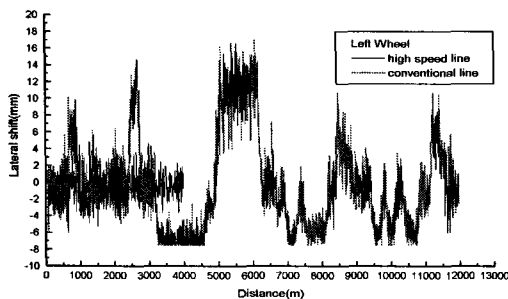


Fig. 1 고속선과 기존선 주행시 레일에 대한 왼쪽차륜의 상대변위

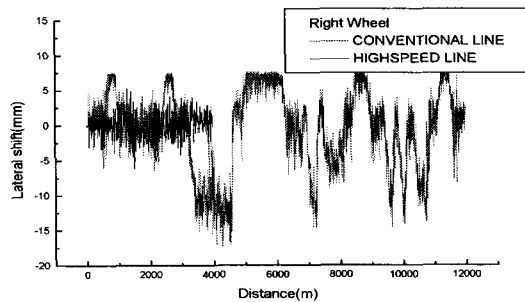


Fig. 2 고속선과 기존선 주행시 레일에 대한 오른쪽차륜의 상대변위

Fig. 3과 Fig. 4는 고속선주행시 차륜담면의 마멸수 분포를 보여준다. 그림에서와 같이 마멸수는 대부분 1 이하로 작으며 기준위치를 중심으로 대칭인 분포를 보여준다. 따라서 마멸패턴도 기준위치 접촉점을 기준으로 대칭인 형태를 보일 것이다. 주로 담면마멸이 구름접촉에 의한 마멸로 마멸수가 작기 때문에 마모율과 마멸량도 매우 작을 것으로 예상된다. Fig. 5와 Fig. 6은 기존선주행시 담면마멸의 예를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 차륜 플랜지 부위쪽 담면이 접촉할 때에 마멸이 큰 것을 알 수 있다. 필드쪽 담면접촉의 경우 접촉회수도 작고 마멸수가 랜덤하게 분포하는 것을 볼 수 있는데 이는 접촉패턴이 일정하지 않은 것을 보여준다.

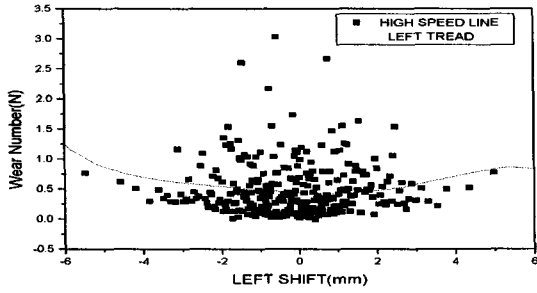


Fig. 3 고속선 주행시 횡변위에 따른 왼쪽 차륜 답면마멸수 분포

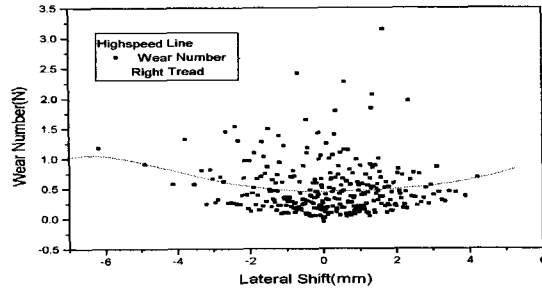


Fig. 4 고속선 주행시 횡변위에 따른 오른쪽 차륜 답면마멸수 분포

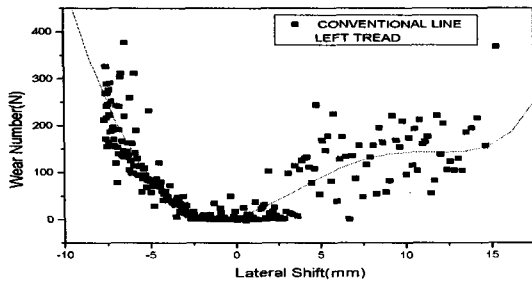


Fig. 5 기존선 주행시 횡변위에 따른 왼쪽 차륜 답면마멸수 분포

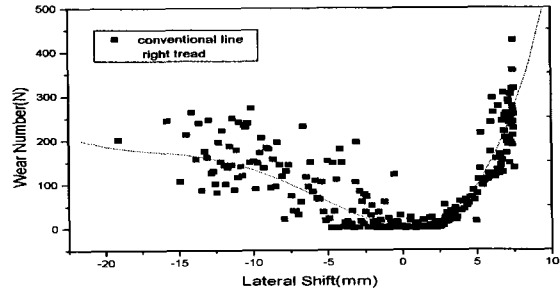


Fig. 6 기존선 주행시 횡변위에 따른 오른쪽 차륜 답면마멸수 분포

기존의 연구결과, 차륜과 레일의 횡변위에 따른 접촉빈도와 마멸수 분포 해석을 통하여 고속선의 경우에는 차륜과 레일의 중심부근에서의 답면접촉이 지배적이고 정상마모상태인 것을 알 수 있었으며, 기존선의 경우는 곡선부 영향으로 플랜지 하단부 답면접촉과 플랜지 접촉빈도가 크고 과대마모상태임을 확인할 수 있었다. 또한 기존선 운행시에 답면마모가 없고 플랜지마모가 급격하게 발생하는 경우에 윤중변동이 기준치를 초과하는 결과가 나타났으며, 전체적으로 마모가 진전되면서 탈선계수와 윤중변동이 증가하는 경향을 얻었다. 플랜지만의 급격한 마모가 발생한 경우보다는 마모가 답면부위와 동시에 발생하는 경우가 주행안전성 측면에서 조금 더 양호한 결과를 얻었다.

3. 횡압에 의한 궤도의 변형

궤도에서 레일 두부에 횡압이 작용하면 레일은 횡변형과 레일 저부중앙을 중심으로 하는 회전(경사)을 발생한다. 이들은 상호 연관되어 있어서 본래는 연립방정식으로서 그 해를 구하지 않으면 안되지만 이를 엄밀하게 해석한 결과에 의하면 그 연성은 약하여 양자를 분리하여 해석하여도 특별히 문제가 되는 것이 없는 것으로 밝혀졌다. 본 논문에서는 이것을 궤도의 횡변형과 회전변형을 나누어 검토하고자 하며 현장측정을 통해 산출된 궤도의 횡변형과 비교분석하여 궤도의 횡변형이 레일의 마모 및 손상에 미치는 영향에 대해 검토하고자 한다..

3.1 궤도의 횡변형 해석

궤도에 작용하는 횡압은 편측의 레일만에 작용하는 경우에도 침목을 통하여 좌우의 레일에 나누어지므로 윤중의 경우처럼 궤도에 대한 영향을 편측의 레일로 나누어 고려할 이유는 없다. 실험에 의하면 레일은 횡방향에는 레일 및 침목 사이의 레일 체결장치의 강성과 도상 한가운데를 침목이 이동할 때의 도상 횡강성의 2종류의 강성으로 지지되고 있는 연속탄성지지 모델을 고려하면 그 변형의 방정식은 식 (1)과 같은 방법으로 다음과 같이 주어진다.

$$EI_y = \frac{d^4 Z_R}{dx^4} + K_1(Z_R - Z) = 0, \quad EI_y = \frac{d^4 Z_L}{dx^4} + K_1(Z_L - Z) = 0 \quad \text{식(1)}$$

$$k_1(Z_R - Z) + k_1(Z_L - Z) = 2k_2 Z$$

여기서,

EI_y : 레일의 휨강성, Z_R, Z_L, Z : 좌우레일, 침목 중앙의 횡변위

k_1 : 단위 길이당 침목 횡 스프링계수, k_2 : 단위 길이당 도상 횡 스프링계수

상기 식을 다음의 경계 조건하에서 정리하면,

$$x=0 \text{에서, } \frac{dZ_R}{dx} = \frac{dZ_L}{dx} = 0, \quad 2EI_y \frac{d^3 Z_R}{dx^3} = H, \quad 2EI_y \frac{d^3 Z_L}{dx^3} = H$$

$$x=\infty \text{에서, } Z_R = Z_L = 0$$

레일 횡변위 Z_R, Z_L 및 휨모멘트, M, M' 는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_R = \frac{1}{16EI_y} \left\{ \frac{H+H'}{\beta_2^3} \phi_1(\beta_2 x) + \frac{H-H'}{\beta_1^3} \phi_1(\beta_1 x) \right\}, \quad Z_L = \frac{1}{16EI_y} \left\{ \frac{H+H'}{\beta_2^3} \phi_1(\beta_2 x) - \frac{H-H'}{\beta_1^3} \phi_1(\beta_1 x) \right\}$$

$$M_R = \frac{1}{8} \left\{ \frac{H+H'}{\beta_2^3} \phi_1(\beta_2 x) + \frac{H-H'}{\beta_1^3} \phi_1(\beta_1 x) \right\}, \quad M_L = \frac{1}{8} \left\{ \frac{H+H'}{\beta_2^3} \phi_1(\beta_2 x) - \frac{H-H'}{\beta_1^3} \phi_1(\beta_1 x) \right\}$$

$$Z = \frac{k_1(Z_R + Z_L)}{2(k_1 + k_2)}, \quad \beta_1 = \sqrt[4]{\frac{k_1}{4EI_y}}, \quad \beta_2 = \sqrt[4]{\frac{k_1 k_2}{4EI_y(k_1 + k_2)}}$$

레일과 침목간의 횡압력 즉, 레일 횡압력은 다음과 같다.

$$R_R = 2 \int_0^{a/2} k_1(Z_R - Z_L) dx = \frac{1}{2} \left[(H+H') \left\{ 1 - \phi_4\left(\beta_2 \frac{a}{2}\right) \right\} + (H-H') \left\{ 1 - \phi_4\left(\beta_1 \frac{a}{2}\right) \right\} \right]$$

$$R_L = 2 \int_0^{a/2} k_1(Z_R - Z_L) dx = \frac{1}{2} \left[(H+H') \left\{ 1 - \phi_4\left(\beta_2 \frac{a}{2}\right) \right\} - (H-H') \left\{ 1 - \phi_4\left(\beta_1 \frac{a}{2}\right) \right\} \right]$$

3.2 레일 회전(경사)

레일 회전에 관한 이론해는 레일비틀림의 중심을 레일 저면이라고 생각하고 단순 비틀림으로 가정하여 유도한 것이다. 이 가정에 의하면 기초방정식은 비틀림모멘트 M , 단면력 $c\theta$ 와 지점 반력을 고려하여 구하고, 임의의 스패에서의 균형식을 구하면 다음과 같다.

$$-c\theta = \frac{M}{2} - K \cdot \left(\frac{1}{2}\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_i \right) \quad \text{식(2)}$$

인접한 양 스패단이 θ 가 같고 너무 길지 않은 연장 내의 일정침목 j 에서 $\theta_j = 0$ 이 되는 조건하에 식(2)을 풀면 다음과 같다.

$$\theta_i = t_i(\lambda) \frac{a}{c} M, \quad \lambda = \frac{aK}{c} \quad \text{식(3)}$$

또한 λ 는 궤도 제3계수이며 현재 일본국철에서 레일체결장치를 설계할 때에는 식(3)을 이용하고 있다. 레일 회전각의 일반적인 상황을 알기 위한 별도의 해로써 횡압에 대한 비틀림 반이 레일저부 길이방향으로 연속 분포한다고 가정하고 균형을 고려하여 구한 기초방정식은 다음과 같다.

$$C \frac{d^2 \theta}{dx^2} - k'\theta = 0 \quad \text{식(4)}$$

여기서, $k'(=k'/a)$ 는 단위 길이당 회전저항계수이다. 식(4)를 다음의 경계 조건 하에서 해석한다.

$$x=0 \text{) } C = \frac{d\theta}{dx} = -\frac{1}{2} (Hh - Qe) \quad \text{식(5)}$$

$$x \rightarrow \infty) \theta = 0$$

$$\theta = \frac{\gamma M}{2k'} e^{-\gamma x}, \gamma = \sqrt{\frac{k'}{c}} \quad \text{식(6)}$$

위 식은 대략적인 레일 회전각을 계산할 때 가장 많이 이용되는 식으로 레일처럼 일정구간 내에서는 무한으로 뻗어 있는 것으로 가정할 수 있는 구조에서 레일의 끝에 횡압이 작용하는 경우는 위 식의 2배가 된다.

3.3 레일 회전 저항계수의 산출법

레일 회전각의 산출은 기본적으로는 앞장에 나온 식(3), 식(6)으로 정하지만 여기서 문제가 되는 것은 앞서 말한 바와 같이 회전저항계수 K' 의 평가이다. 즉, 체결장치의 구조 또는 스프링정수의 변화에 직접적으로 관계되는 것이 바로 이 K' 인 것이다. 따라서 이장에서는 기존의 회전저항계수 산출방법과 수정한 회전저항계수 산출방법을 비교하여 나타냈다. 또한 여기서 사용하는 레일압력 W_1 은 Zimmerman의 등간격 탄성지점상 연속보의 계산방법에 따라 구했다. 회전저항계수 K' 는 레일 단부가 레일 패드와 분리현상이 일어나지 않은 경우와 분리된 상황인 두 가지 경우로 분류하여 산출한다. 본 연구에서는 운행선 궤도에서 측정된 궤도의 응답과의 비교분석이 주목적이므로 레일 단부가 레일 패드에서 분리될 경우와 같은 극한의 상황을 가정하지 않은 해석을 수행하고자 한다. 레일단부가 레일패드와 분리현상이 일어나지 않은 경우 ($\theta \leq 2\Delta L/b_1$) 레일 회전에 의해 레일 누름 스프링 및 궤도패드가 받는 힘은 레일 회전각을 θ , 궤도 패드의 스프링 계수를 K_p , 레일 바닥부가 궤도패드에 접하는 폭을 b_2 , 레일 누름스프링의 수직 스프링 계수를 K_c (편측)라 하면 다음과 같이 산출한다. 우선 궤도 패드의 저항 모멘트 M_p 는 다음과 같다.

$$M_p = 2 \int_0^{b_1/2} \frac{b_1}{2} \theta \cdot \frac{x}{b_1/2} \cdot x \cdot \frac{K_p}{b_1} dx = 2 \frac{K_p \theta}{b_1} \int_0^{b_1/2} x^2 dx = \frac{K_p b_1^2}{12} \theta \quad \text{식(7)}$$

레일 회전에 의해 레일 누름 스프링의 압력변화 ΔF_{f0} , 저항 모멘트 M_C 는 다음과 같다.

$$\Delta F_{f0} = \pm K_C b_2 / 2 \cdot \theta, M_C = \frac{1}{2} K_C b_2^2 \theta \quad \text{식(8)}$$

$$\text{따라서 저항 모멘트 } M \text{은 } M = M_p + M_C = \left\{ \frac{1}{12} K_p b_1^2 + \frac{1}{2} K_C b_2^2 \right\} \theta \quad \text{식(9)}$$

임으로 레일 회전에 대한 2중 탄성 레일 체결장치의 저항 모멘트 계수 K' 은 다음과 같다.

$$K' = \frac{1}{12} K_p b_1^2 + \frac{1}{2} K_C b_2^2 \quad \text{식(10)}$$

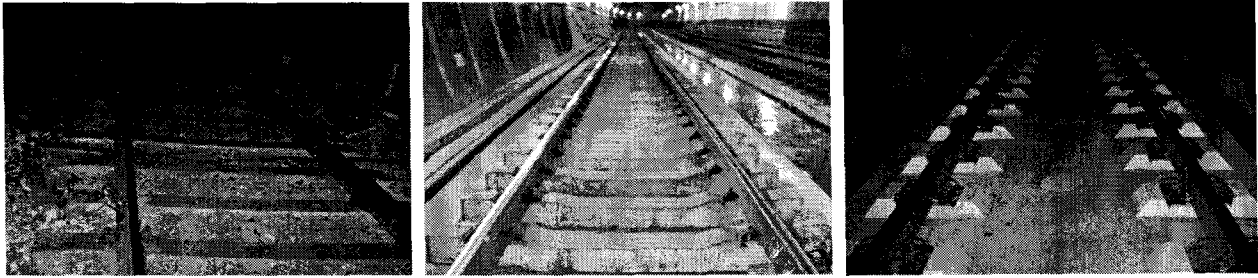
위의 식이 일반적으로 사용하는 회전저항계수의 기본식이나 레일 저면이 전면에 걸쳐 레일패드에 지지되고 체결 스프링의 저항도 항상 일정하다고 가정한 완전탄성범위 내에서만 성립한다. 즉, 레일 단부가 레일 패드보다 들뜨지 않을 경우에 성립하는 것이다. 레일 체결장치의 설계 시에는 레일 회전의 대소에 따라 가정식의 적용 조건을 정하고 1 체결당 회전저항계수 K' 를 산출한 다음 식(3)을 이용하여 계산하고 있다. 또한 이 경우 레일 단부가 레일 패드로부터 들리는지의 여부를 판단하는 기준이 되는 ΔL 은 체결스프링의 초기 체결력을 무시하고 레일압력에만 의존한 레일 패드의 압축량 즉, $\Delta L = W_1/K_p$ 으로 판별하고 있다.

4. 현장측정

4.1 측정시스템 구축

곡선반경이 R400으로 동일하고 궤도형식이 상이한 각각의 구간에서 곡선부 궤도의 거동특성을 검토하고 궤도의 탄성거동이 레일마모에 미치는 영향을 평가하고자 열차 통과에 따른 궤도의 동적응답 중 궤도(레일, 침목 및 패드)의 변위 및 운중, 횡압을 측정하였다. 궤도시스템은 자갈도상, 방진상궤도(PPT), B2S(Ballasted track to Slab track)시스템으로 선정하였으며, 측정지점에 대한 궤도조건 및 기타 제원 등을 정리하여

Table. 1에 나타내었다.



(a) Ballast track (b) Concrete track I (PTT) (c) Concrete track II (B2S)
Fig. 7 측정구간의 전경

Table. 1 현장측정개소 현황

| 구분 | 차갈 | | 콘크리트 (PTT) | 콘크리트 (B2S) |
|----------|----------|----------|------------|------------|
| | Block A | Block B | Block C | Block D |
| 부설일자 | 98.03.03 | 00.11.16 | 01.10.10 | 06.11.22 |
| 레일중량 | 50kg N | 60kg K | 60kg K | 60kg K |
| 침목종류 | PC침목 | PC침목 | - | - |
| 통과톤수(억톤) | 5 | 3.5 | 3.1 | 1.5 |
| 레일연마횟수 | 5회 | 9회 | 10회 | 4회 |
| 적마모(mm) | 2.5 | 1.8 | 1.7 | 1.5 |

궤도의 변위, 운중 및 횡압은 변위계와 스트레인게이지를 이용하여 측정하고 증폭기를 통해 증폭된 신호들을 MGC-PLUS(Data Acquisition System)에 저장한 후, 오리진™ 프로그램을 이용하여 분석하였다. 측정항목별 센서 배치는 그 목적에 따라 다르며, 측정위치를 표준화하여 구간별로 동일한 위치에서 측정하였다. 또한, 단일시간대 중 승객수 및 운행빈도가 가장 많아 궤도부담력이 가장 클 것으로 판단되는 출근시간대(오전 06:00~08:30)를 선정하여 현장측정을 실시하였다.

대상선로에서 측정된 운중, 횡압 및 변위응답은 증폭기를 통해 증폭된 신호들을 MGC-PLUS(Data Acquisition System)에 저장한 후, 오리진™ 프로그램을 사용하여 분석하였다. 현장측정을 위한 센서는 곡선부 궤도의 내외측에 동일하게 설치하였으며 센서설치위치도는 Fig. 8과 같다.

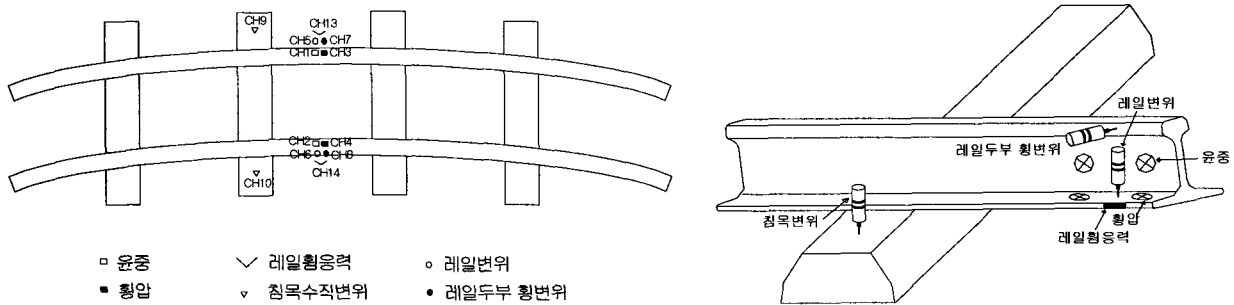


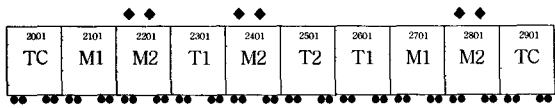
Fig. 8 센서설치위치도

현장측정시스템은 변형률 게이지, 변위계를 조합하여 24개의 채널을 동시 측정할 수 있도록 시스템을 구성하였으며, 측정된 하중, 변위신호들은 Dynamic Strain Amplifier를 통해 증폭된 후 측정신호 저장장치인 MGC-PLUS 내부로 저장된다.

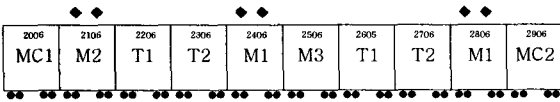
4.2 측정구간의 차량제원

측정구간에서 사용되는 차량은 4, 6, 10량 편성으로 구성되어 있으며, 본 현장측정에서는 10량 편성의 차량에 대해서만 측정하였다.

Fig. 9는 측정구간의 차량구성도를 보여준다. 현재 운행되고 있는 열차의 길이 및 대차중심간 거리, 고정축간 거리와 같은 차량의 제원은 Table. 2와 같다.



(a) VVVF 전동차(2호선)



(b) 초파차(2호선)

Fig. 9 서울메트로 차량구성

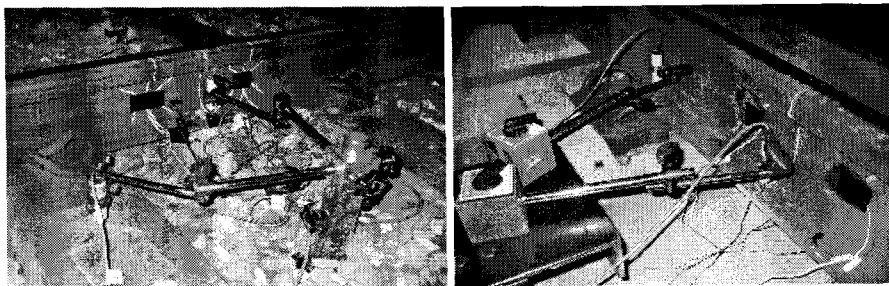
Table. 2 서울메트로 2, 3호선 차량제원

| 구분 / 항목 | | 제원 | |
|---------|------|--|--|
| 제어방식 | | 초파제어 | VVVF제어 |
| 전동차편성 | | 4, 6, 10량 | 4, 10량 |
| 제작년도 | | 1981-1995 | 2005 |
| 승객정원 | | 160명 제어차 : 48명 기타 : 54명 | 160명 제어차 : 48명 기타 : 54명 |
| 자중(톤) | | MC1, MC2 : 41.5 M1, M2 : 41.5 T1, T2 : 32.0 M3 : 41.5 | TC : 34.42 M1 : 34.78 M2 : 36.43 T1 : 29.15 T2 : 33.02 |
| 대차 | 대차방식 | 공기스프링 | 공기스프링 볼스타레스 |
| | 고정축거 | 2,100mm | 2,100mm |
| | 차륜경 | 860mm | 860mm |

4.3 측정항목 및 방법

1) 변위

궤도의 상태파악을 위한 기초자료로서 레일 및 침목의 수직변위를 측정하였으며, 이를 변수로 동적운중에 대한 궤도의 탄성지지력을 추정하고자 하였다. 주행중인 열차에 의한 최대 동적하중에 대한 레일과 침목의 변위를 측정하기 위한 변위계 설치전경은 Fig. 10과 같다.



(a) 자갈도상

(b) 콘크리트도상(B2S)

Fig. 10 변위계 설치전경

2) 윤중과 횡압

윤중계이지 설치위치는 측정구간의 내·외측 레일에 Fig. 11과 같이 침목간 중심에서 각각 100mm 떨어진 위치에 레일복부의 중립축에 45°의 각도를 가지고 8방향으로 결선된 윤중계이지를 부착하여 측정한다. 또한 횡압측정도 Fig. 11과 같이 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 레일 플랜지 내·외측에 변형률 게이지를 부착하고 결선면 레일 종방향 휨의 영향을 배제시켜 전단변형률로써 측정할 수 있다. 그 위치는 레일복부와 플랜지 사이의 우각부에는 변형률 게이지가 들어가지 않으므로 될 수 있는 한 복부에 가깝게 부착한다. 윤중 측정계이지는 레일 복부상의 중립축에 부착이 가능하기 때문에 완전한 전단변형 측정이 될 수 있지만, 횡압계이지는 중립축에 부착이 곤란하기 때문에 이와 같이 배치한다. 계측시 열차는 고속으로 주행하므로 실제 발생한 윤중을 왜곡하거나 데이터의 손실이 발생되지 않도록 충분한 수집율(Sampling Rate)을 설정하였다. 그리고 발생한 윤중 이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석을 통해 디지털 필터로 로패스 필터링과 하이패스 필터링 처리를 함으로써 데이터의 신뢰성을 높였다. 횡압계이지 부착위치는 곡선구간을 주행하는 열차에 의해 레일 및 궤도에 발생하는 동적횡압을 파악하기 위해 곡선구간 내·외측 레일에 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 레일에 발생하는 횡압을 측정하기 위한 횡압계이지 설치전경 및 부착도는 Fig. 11과 같다.

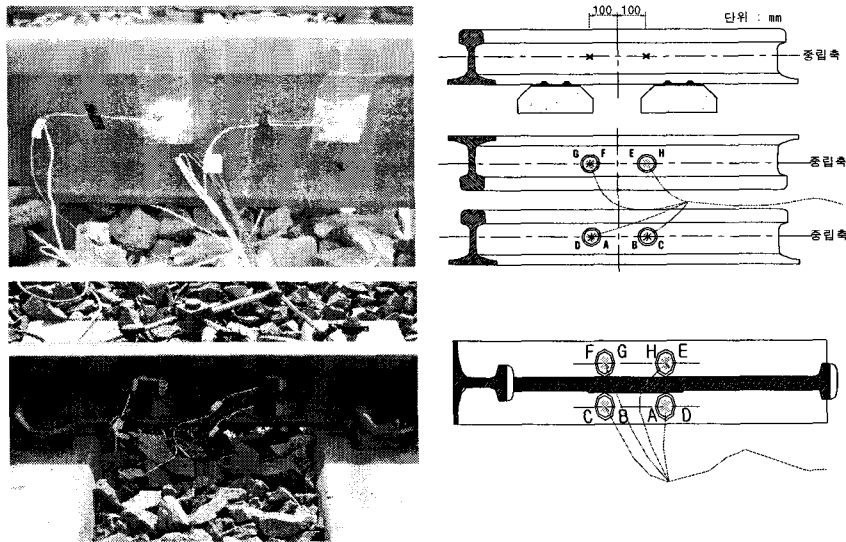


Fig. 11 윤중과 횡압게이지 설치전경 및 부착도

레일에 부착한 변형률 게이지를 통하여 직접 측정된 값은 윤중 및 횡압에 비례하여 발생하는 변형률 데이터로써 데이터 수집장비(Data Acquisition System)를 통하여 얻은 변형률을 실제 작용하는 윤중과 횡압의 절대량으로 환산하기 위하여 검정(Calibration)을 수행하고 이때 얻어진 정적 윤중 및 횡압 데이터를 이용하여 선형회귀분석(Linear Regression)을 통해 환산윤중, 횡압을 도출함으로써 하중단위의 동적 윤중, 횡압값을 구한다. Fig. 11과 같이 윤중 및 횡압게이지를 레일에 부착하고, 유압재를 이용하여 Fig. 12와 같이 0kN에서 40~50kN까지 정적하중을 단계적으로 가압하여 이때 발생한 계측값을 기록한다. 이때 오차발생과 선형회귀식의 신뢰성을 고려하여 3회 이상 동일한 실험을 반복하였다.

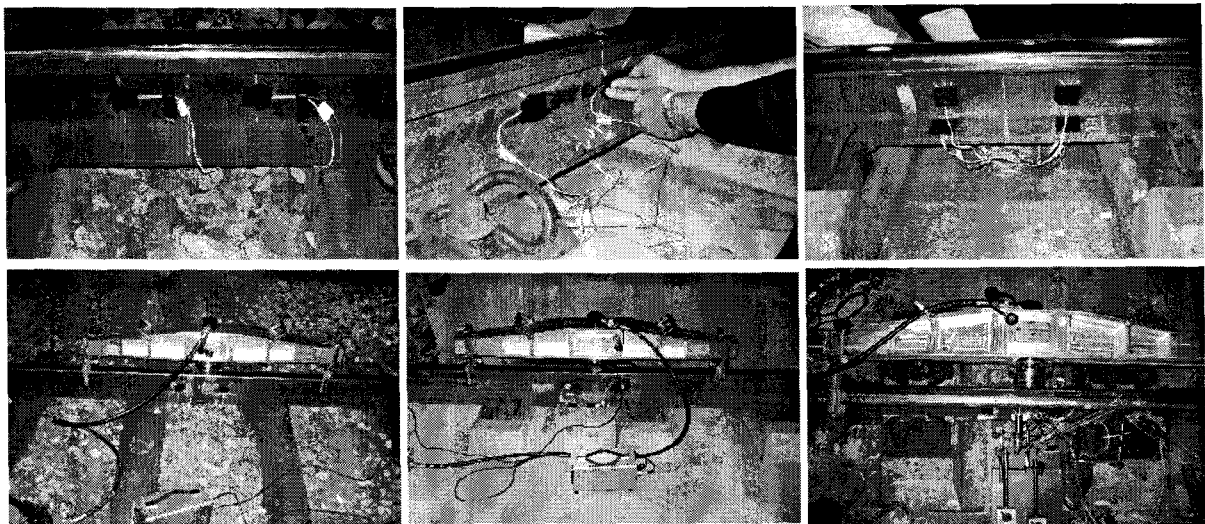


Fig. 12 윤중, 횡압게이지 부착 및 하중 검정 전경

Fig. 13은 재하시간 변화에 따른 내·외측 레일에 재하한 정적 작용하중(데이터 수집장치에 저장된 변형률 데이터)을 도시한 그림과 측정 변형률을 레일에 작용한 윤중으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석의 결과를 나타낸다.

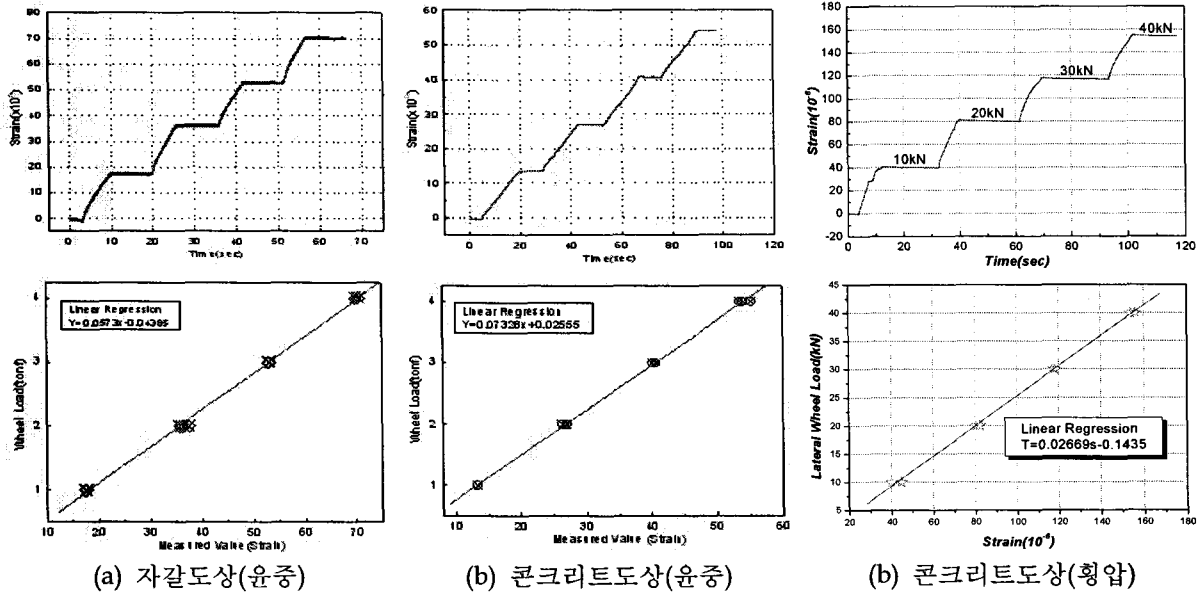
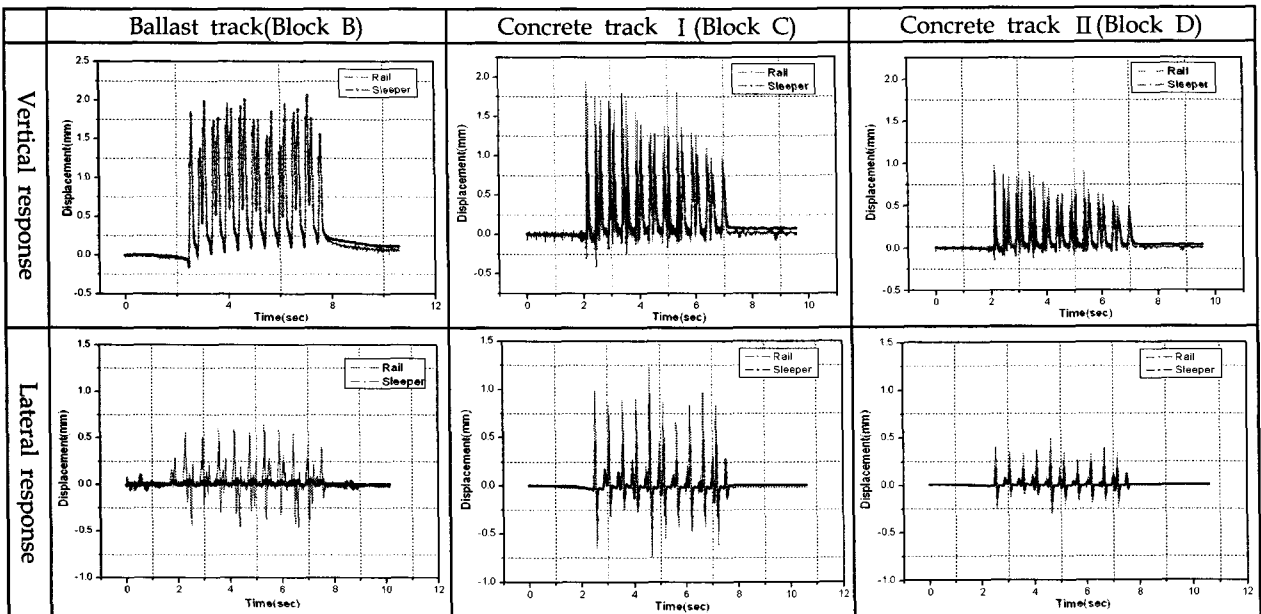


Fig. 13 운중 및 횡압 검정 및 회귀분석

5. 측정결과 및 분석

곡선부 열차 주행시 발생하는 레일의 동적변위 응답을 파악하기 위해 곡선부 내·외측 레일의 동일한 위치에서 발생응답을 비교·분석하였다. 곡선구간 외측 레일과 침목의 수직 및 횡변위를 측정하여 유사 속도 대역에서의 구간별 레일 및 침목의 동적 변위응답을 비교하여 그 결과를 Table. 3에 나타내었다.

Table. 3 구간별 궤도의 수직-횡변위 응답파형



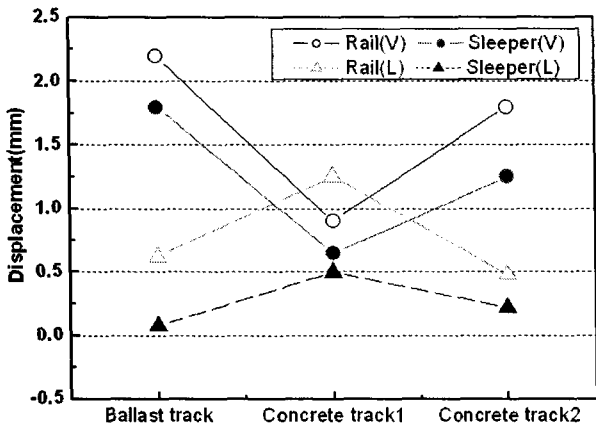


Fig. 14 궤도의 수직-횡변위 측정결과 종합

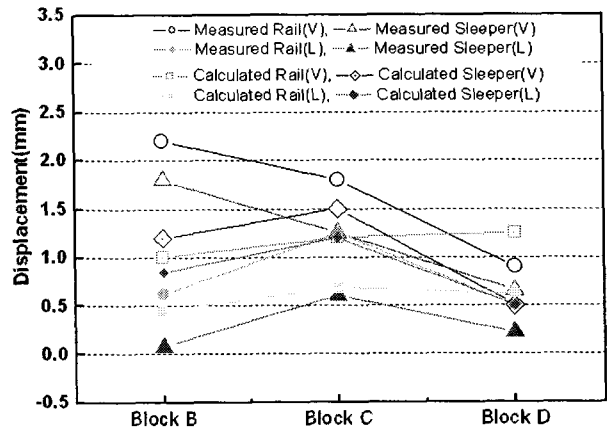


Fig. 15 궤도의 수직-횡변위 측정 및 해석 결과

Fig. 14는 측정결과 중 최대값을 중심으로 정리한 것이며 Fig. 15는 3절에서 언급한 횡압에 의한 궤도변형의 해석방법을 이용한 각 구간별 궤도구조의 수직 및 횡방향 거동을 측정결과와 비교분석한 것이다. 측정 구간에서의 궤도의 윤중, 횡압을 비롯한 수직, 횡방향 변위 측정결과, 구간별 동적 윤중의 크기는 유사속도 대역에서 대부분 유사한 수준으로 나타났으며 이때 측정된 동적 윤중을 활용하여 해석 궤도변위를 도출하였다. 구간 A의 경우 도상상태가 양호하여 일반적인 자갈도상의 거동경향을 나타내었으며 이에 본 연구에서는 비교적 도상자갈의 상태가 불량한 것으로 조사된 구간 B와 구간 C, D에서의 궤도변위량 측정결과를 이용하여 분석하고자 한다.

구간 B의 경우 레일과 침목의 수직변위가 거의 동일한 수준으로 나타나 비정상적인 거동특성을 나타내어 레일의 부담력을 가중 시킬 것으로 예상되었으며 도상자갈의 노후에 따른 세립화현상이 진행 중인 것으로 예측할 수 있었다. 본 측정개소에 대한 육안조사 결과, 도상자갈의 노후화(세립화, 입도불량)현상이 관찰되었으며, 특히 도상자갈의 노후에 따른 뜬침목 발생 등에 의해 레일지지점간 거리의 증가로 레일에서의 과도한 휨이 발생한 것으로 판단된다. 또한 레일의 횡변위에 비해 침목의 횡변위가 매우 작게 나타나 궤도의 횡방향 거동에 문제가 있는 것으로 판단되었다. 이러한 경향은 침목의 측면에서 침목을 지지하고 탄성적인 거동을 유도하여야 하는 도상자갈의 탄성력이 소실된 데에서 기인한 것으로 판단된다.

구간 C의 경우에는 방진상 궤도구조로써 침목의 측면과 바닥이 방진고무상자에 의해 쌓여있으며 침목저부에는 방진패드(8kN/mm)가 삽입되어있어 수직 및 횡방향 탄성이 다른 궤도형식에 비해 비교적 우수한 궤도구조이다. 또한 콘크리트 궤도구조의 특성상 궤도재료의 거동이 비교적 명확하고 상태변화의 폭이 작아 궤도의 동적변위 응답 측정결과가 해석결과와 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 레일수직변위와 횡변위가 상대적으로 크게 나타났으며 이는 킬팅 저항성능이 부족한 플레이트형 레일체결장치와 비교적 단단한 레일패드(400kN/mm)의 영향에 의한 것으로 판단되었다. 구간 D의 경우에도 구간 C와 마찬가지로 예측된 거동을 나타냈으며 전반적으로 다른 구간의 응답치 보다 낮은 수준의 변위가 발생한 것으로 나타났다. 또한 측정결과와 해석결과가 다른 구간에 비해 가장 근접한 것으로 나타나 궤도의 거동예측 및 상태평가가 유리할 것으로 판단되었다.

Table. 4 측정구간의 레일관리이력(마모량)

| 구분 | 레일종류 | 사용기간 | 누적통과톤수 (억톤) | 월평균마모량 (mm) | 교환 주기 | | | 비고 (궤도구조) | |
|----|--------|---------|----------------|----------------|--------|--------|------|-----------------|-----------------------|
| | | | | | 누적통과톤수 | 측마모 한도 | | | |
| B | 60kg K | 1년 6개월 | 0.85 | 0.76 | 약 9년 | 6억톤 | 15mm | 장대, 자갈 V=50km/h | |
| C | 60kg K | 1년 11개월 | 0.76 | 0.55 | 약 11년 | | | 약 23개월 | 장대, 콘도상(PTT) V=55km/h |
| D | 60kg K | 1년 10개월 | 0.9 | 0.58 | 약 11년 | | | 약 22개월 | 장대, 콘도상(B2S) V=55km/h |

Table. 4는 측정구간에 대한 레일관리이력을 레일 마모량을 중심으로 정리하여 나타낸 것으로서 측정 및 해석결과 횡방향 거동특성이 유연한 궤도인 구간 C의 월평균마모량이 가장 양호한 것으로 나타났다. 또한 측정결과 일반적인 자갈도상의 거동특성과 상이하게 나타난 구간 B의 경우 자갈도상이나 콘크리트 궤도구조인 구간 C, D 보다 약 18%정도 월평균마모량이 크게 진전되는 것으로 나타나 레일마모와 궤도의 상태 및 궤도의 수직, 횡방향 탄성거동과 관계가 있음을 입증하였다.

6. 결론

본 연구에서는 도시철도 선로 중 곡선구간에서의 현장측정을 바탕으로 곡선부 궤도의 거동특성을 파악하고 수직 및 횡방향 궤도변위응답을 산정하여, 측정 및 해석결과를 바탕으로 도출한 궤도거동특성과 해당구간에 대한 레일유지관리이력과의 상관관계를 파악하고자 하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 구간 B(자갈도상)의 경우 레일과 침목의 수직변위가 거의 동일한 수준으로 나타나 비정상적인 거동특성을 나타내었으며 도상자갈의 노후에 따른 뜬침목 발생 등에 의해 레일지지점간 거리의 증가로 레일에서의 과도한 휨이 발생한 것으로 판단된다. 또한 레일의 횡변위에 비해 침목의 횡변위가 매우 작게 나타나 도상자갈의 횡방향 탄성력이 소실된 것으로 판단된다.
2. 구간 C(콘크리트궤도:PTT)의 경우에는 궤도의 수직 및 횡방향 거동이 다른 궤도형식에 비해 비교적 유연한 것으로 나타났으며 콘크리트 궤도의 특성상 궤도재료의 거동이 비교적 명확하고 상태변화의 폭이 작아 궤도의 동적변위 응답 측정결과가 해석결과와 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 레일수직변위와 횡변위가 상대적으로 크게 나타났으며 이는 킬팅 저항성능이 부족한 플레이트형 레일체결장치와 비교적 단단한 레일패드의 영향에 의한 것으로 판단되었다.
3. 구간 D(콘크리트궤도:B2S)는 전반적으로 다른 구간의 응답치 보다 낮은 수준의 궤도 변위가 발생하였으며 측정결과와 해석결과가 다른 구간에 비해 가장 근접한 것으로 나타나 궤도의 거동예측 및 상태평가가 유리할 것으로 판단되었다.
4. 측정구간에 대한 레일관리이력을 검토한 결과, 측정 및 해석결과 횡방향 거동특성이 유연한 궤도인 구간 C의 월평균마모량이 가장 양호한 것으로 나타났다. 또한 측정결과 일반적인 자갈도상의 거동특성과 상이하게 나타난 구간 B의 경우 구간 C, D 보다 약 18%정도 월평균마모량이 크게 진전되는 것으로 나타나 레일마모와 궤도의 상태 및 궤도의 수직, 횡방향 탄성거동과 관계가 있음을 입증하였다.
5. 일반적으로 곡선부 레일마모는 콘크리트도상이 자갈도상궤도 보다 약 2배정도 빨리 진행되는 것으로 알려져 있으나 도상자갈의 상태가 불량한 개소는 콘크리트 궤도보다 오히려 레일마모진전이 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 따라서 자갈도상궤도의 경우에는 곡선부 레일마모와 궤도구성품의 손상저감을 위해서 도상자갈의 탄성력 확보가 필요할 것으로 판단된다.
6. 또한 콘크리트 궤도는 기존 자갈도상에 비해 궤도의 탄성을 조절하기가 용이하므로 속도상승과 운행횟수 증가로 인한 레일마모를 최소화하기 위해서는 적정 탄성 확보를 위한 향상된 재질의 패드 사용과 체결장치의 탄성화 및 내구성이 향상된 궤도자재 설치가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Koye, K.A., "Experimental Evaluation of Hamrock and Dowson Elastohydrodynamic Point Contact

Theory", M.S. Thesis, Dec. 1979, Georgia Institute of Technology

2. Koye, K.A. & Winer, W.O., "An Experimental Evaluation of the Hamrock and Dowson Minimum Film Thickness Equation for Fully Flooded EHD Point Contacts", Vol.103 pp. 284-294 April 1981 Journal of Lubrication Technology
3. Beagley, T.M., McEwen, I.J. and Pritchard, C., "Wheel/Rail Adhesion-the Influence of Railhead Debris," Wear Vol. 33. 1975, P.141
4. Beagley, T.M., "The Rheological Properties of Solid Rail Contaminants and their Effect on Wheel/Rail Adhesion", Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 190 33/76. P.419
5. Kalousek, J., "Wear and Contact Fatigue Model for Railway Rail", TR-WE-50, NRC No. 27491, TDC No. TP 8344E, 1986/10, Canada.
6. Lee, Hisung, "A Numerical Solution to the Elastohydrodynamic Problem incorporating a Non-Newtonian Rheological Model", Ph.D. Dissertation, Aug. 1991, Georgia Institute of Technology.
7. 이희성, 강부병, "Bair & Weiner 리올로지 모델을 사용한 선접촉 탄성유체윤활 해석" 대한기계학회 춘계 학술대회논문집, 1998, pp.696-701
8. Bair, S. and Winer, W.O., "A Rheological Model Elastohydrodynamic Contacts based on Primary Laboratory Data", Journal of Lubrication Technology, Vol. 101, 1979, pp.258-265.
9. Bair, S. and Winer, W.O., "Shear Strength Measurements of Lubricants at High Pressures", Transactions of the ASME, 78-Lub-8, pp.1-4.
10. Gecim, B. and Winer, W.O., "Lubricant Limiting Shear Stress Effect on the Film Thickness", Jour. of Lub. Tech., Vol.102, April 1980, pp.213-221.
11. Houpert, L.G. and Hamrock, B.J., "Fast Approach for Calculation Film Thickness and Pressure in Elastohydrodynamically Lubricated Contacts at High Loads", Journal of Tribology, Vol. 108, Jul. 1986, pp. 411-420.
12. Yasutomi, S., Bair, S. and Winer, W.O., "An Application of a Free Volume Model to Lubricant Rheology 1 - Dependence of Viscosity on Temperature and Pressure", Transactions of the ASME, Journal of Tribology, Vol. 106, April 1984, pp.291-303.
13. Yasutomi, S., Bair, S. and Winer, W.O., "An Application of a Free Volume Model to Lubricant Rheology 1 - Variation in Viscosity of Binary Blended Lubricants", Transactions of the ASME, Journal of Tribology, Vol. 106, April 1984, pp.304-312.
14. Bair, S. "High Shear Stress Rheology of Liquid Lubricants", Ph.D. Thesis, G.I.T.
15. Wang, S.H. and Zhang, H.H., "Combined Effects of Thermal and Non-Newtonian Character of Lubricant on Pressure, Film Profile, Temperature Rise and Shear Stress in E.H.L.", Journal of Tribology, Vol. 109, Oct. 1987, pp. 666-670.
16. Sui, P.C., and Sadeghi, F., "Non-Newtonian Thermal Elastohydrodynamic Lubrication", Transactions of the ASME, Journal of Tribology, Vol. 113, April 1991, pp. 390-397.
17. Evans, C.R. and Johnson, K.L., "Regimes of Traction in Elastohydrodynamic Lubrication", Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 200, No. C5, 1986. pp.313-325.
18. Nagaraj, H.S., Sanborn, D.M. and Winer, W.O., "Surface Temperature Measurements in Rolling and Sliding EHD Contacts", ASLE Transactions Vol. 22, pp 277-285.
19. Dowson, D and Higginson, G.R., "Elasto-Hydrodynamic Lubrication", Pergamon Press. 1966.
20. Dowson, D. and Toyoda, S., "A Central Film Thickness Formula for Elastohydro dynamic Line Contacts", Proceedings of the 5th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 1978. pp.60-65.
21. Martland, Carl D. and Auzmend. Alvaro R., "A simplified Model of rail wear for use in track maintenance planning and cost," REPORT No. R-742, AAR Research and Test Department, 1990.