

레일의 단장파장 결함에 따른 궤도의 동적응답 변화특성 분석

Dynamic response characteristics of ballast track according to rail corrugation

최진유* 황만호** 양신추*** 황성호****

Choi, Jin Yu Hwang, Man Ho, Yang, Shin Chu, Hwang, Sung Ho

ABSTRACT

A numerical analysis was performed to verify how much additional force is induced by short or long pitch rail corrugations in track. The rail corrugations assumed as sine wave having various pitches and depths. The variation of wheel force, displacement and acceleration of rail and sleeper was investigated. In the results, it was shown that each item of the investigation was increased as the pitches and depths become large. It is expected that the results of the parametric study can be used as a preliminary data for the determination of economical maintenance criteria for rail corrugation in the future

1, 서론

점진적인 궤도침하와 보수작업에 의한 복원이 반복되는 유도상궤도의 경우, 유지보수주기의 예측과 궤도구조의 선택 등을 위한 궤도상태의 열화 및 복원 모델의 구축은 중요한 과제이다. 궤도상태의 열화는 주로 궤도틀림의 형태로 나타나는데 궤도틀림의 원인과 그 원인에 따른 정량적인 궤도틀림의 진전에 관한 연구는 일본이나 유럽 등지에서 활발하게 연구가 진행 중이다. 일반적으로 궤도틀림의 진전 즉 궤도상태의 열화에 영향을 미치는 원인으로는 도상자갈 자체의 손상, 노반강성의 변동으로 인해 발생하는 도상의 불규칙한 침하, 용접부의 결함 등으로 인한 레일자체의 선형불량 그리고 차량에 의한 동적하중의 변동 등이 주요 원인으로 밝혀져 있다. 최근 들어 보다 정확한 궤도틀림을 예측하기 위하여 레일이나 도상자갈, 궤도패드 등의 궤도재료열화가 궤도틀림진전 및 보수작업에 의한 궤도틀림 잔존량에 미치는 영향이나 작업방법 등에 따른 불확정성이 고려된 보다 실제에 가까운 예측모델의 구체화가 요구되고 있다. 본 연구에서는 궤도틀림진전예측모델 수립을 위한 연구의 기초연구로서 여러 가지 궤도열화의 현상 중에서 레일의 마모가 궤도틀림에 미치는 영향을 분석하여 보았다. 레일의 요철발생 정도에 따른 궤도 부담력의 증가를 알아보기 위해 윤중 변동량을 분석하여 보았다. 그리고 윤중변동량을 통하여 요철에 의한 궤도의 충격계수 및 탈선방지를 위한 윤중빠짐 허용한도와 비교분석을 수행하였다. 궤도의 거동에 크게 영향을 미칠 수 있는 손상은 파상마모에 의한 요철과 용접부에서의 요철로 생각할 수 있는데, 본 연구에서는 연구의 주요 목적이 궤도재료의 열화에 초점이 맞추어져 있으므로 레일의 공용기간 중에 발생하는 레일 표면의 파상마모에 대한 영향만을 검토하였다.

* 최진유, 정회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 궤도구조연구팀

E-mail : jychoi@krri.re.kr

TEL : (031) 460-5338 FAX : (031) 460-5814

** 한국철도시설공단 차장

*** 한국철도기술연구원 책임연구원

**** 한국철도기술연구원 주임연구원

2. 수치해석

2.1 해석 개요

레일의 요철에 따른 영향을 분석하기 위하여 레일 요철의 크기와 파장을 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 궤도시스템의 동적해석을 위한 해석프로그램으로는 네덜란드 델프트 공과대학에서 개발된 궤도시스템 전용 해석 프로그램인 DARTS를 사용하였다.

2.2 동적수치해석을 위한 모델링

가. 궤도 모델

자갈도상궤도의 해석을 위한 모델의 기본형상은 (그림 1)과 같고 각 궤도구성요소의 물성치는 표 1과 같다. 레일은 전단을 고려한 Timoshenko Beam을 사용하였으며, 레일패드는 스프링과 댐퍼로, 침목은 강체거동을 하는 질량체로, 자갈도상과 궤도하부 노반은 하나의 스프링과 댐퍼로 모델링하였고 침목을 제외한 궤도 구성체의 질량은 무시하였다.

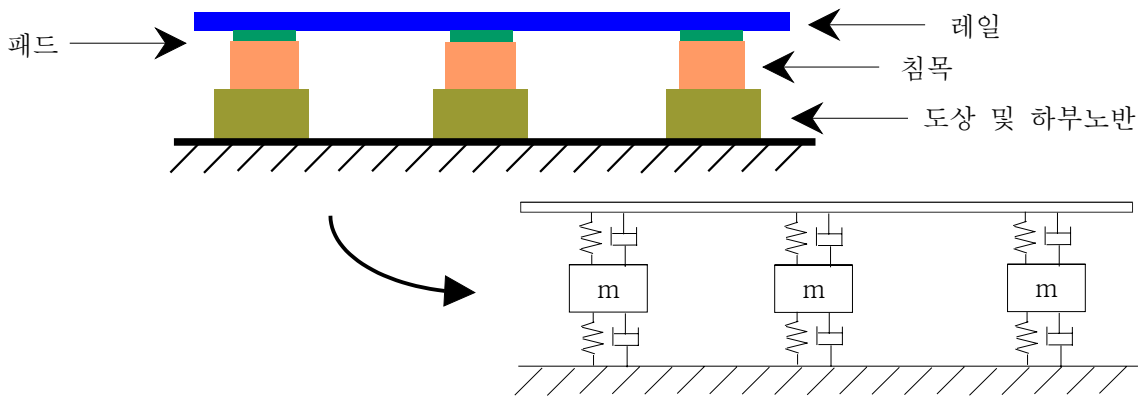


그림 1. 궤도해석의 기본 모델

표 1. 해석에 사용된 궤도 물성치

항목	물성치 및 제원	항목	물성치 및 제원
레일	UIC60	침목단위길이당 질량	0.24 ton/m
레일패드스프링계수	90×10^3 kN/m	침목침목간격	0.60 m
레일패드댐핑계수	3.0×10^1 kN/sec/m	도상 및 노반 탄성계수	1.26×10^5 kN/m
침목저면유효폭	0.27 m	도상 및 노반 댐핑계수	98 kN/sec/m

나. 차량 모델

차량은 KTX차량의 각종 제원을 기본으로 하였다. 차량의 주행안전성을 검토하기 위해서는 실제 주행하는 20량 1편성의 차량을 고려하여 해석하는 것이 합리적이지만 본 검토의 목적인 궤도의 거동을 살펴보는 목적으로는 가장 큰 중량을 가진 동력차만을 고려하여 해석하여도 결과에 영향이 없기 때문에 동력차 부분만을 고려하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 차량의 모델은 (그림 3)과 같으며 물성치 및 제원은 (표 2)와 같다. 차체는 강체거동을 하는 질량체로, 차체 아래의 2차 현가장치는 스프링과 댐퍼

로, 대차는 강체거동을 하는 질량체로, 대차아래의 1차 현가장치는 스프링과 댐퍼로 모델링하였다. 차량의 바퀴는 강체거동을 하는 질량체로 모델링하였으며, 휠과 레일의 접촉효과는 헤르쯔안 스프링으로 모델링하여 고려하였다.

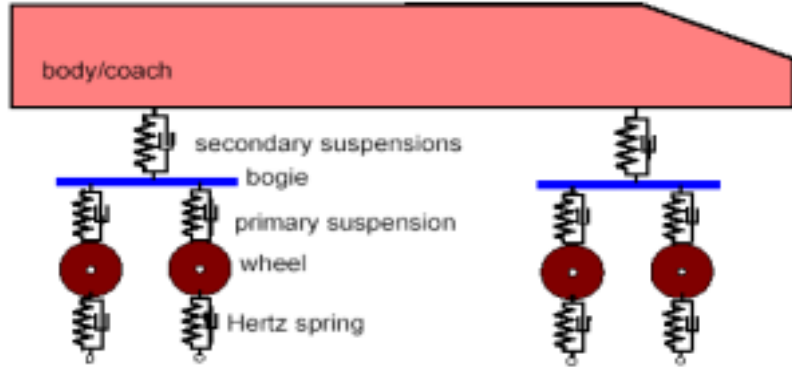


그림 2. 해석에 사용된 차량 모델

표 2. KTX 동력차 및 동력대차의 물성치 및 제원

항목	물성치 및 제원
차체질량(ton)	54.96
차체의 관성모멘트(Gallop motion, $\text{ton} \cdot \text{m}^2$)	1131.9
대차질량 (ton) (스프링하질량 포함)	2.42
대차의 관성모멘트 (Y-Y) ($\text{ton} \cdot \text{m}^2$)	2.593
스프링하질량(윤축질량) (ton)	2.048
1차 현가장치 스프링 (MN/m)	2.504
1차 현가장치 댐퍼 (MN/sec/m)	0.032
1차 현가장치 스프링 (MN/m)	2.536
1차 현가장치 댐퍼 (MN/sec/m)	0.057

다. 요철모델

레일의 요철은 웨도틀림으로 표현함으로써 반영하였는데, 실제 현장에서 계측된 데이터를 활용하는 것이 가장 정확하게 현상을 표현할 수 있지만, 현재 운영되고 있는 레일마모 검측차량에서 도출되는 결과가 주파수별 필터링이 되어 출력되는 관계로 가공되지 않는 실측자료가 없기 때문에 Ishida(1997) 등이 적용한 것과 같이 요철의 형상을 사인파로 가정하는 방법으로 해석을 수행하였다.

그림 3. 해석에 고려된 요철의 형상화


2.3 해석 경우

레일의 요철에 의한 영향은 차량의 운행속도 및 차량과 궤도시스템의 동특성과 연계되어 궤도의 동적응답으로 나타나게 된다. 본 연구에서는 차량의 주행속도를 고속철도의 최대주행속도인 300km/hr로 고정하고, 요철의 파장과 파고를 변화시켜가면서 응답을 검토하였다. 레일요철의 길이에 대한 연구자들마다 다르게 정의하고 있는데, 본 연구에서는 국내 고속철도 궤도유지관리 설명서와 참고문헌 3과 4에서 제시하고 있는 정의를 따랐다. 즉 단파장 요철은 파장길이 3cm~8cm의 요철을, 장파장 요철은 파장길이 8cm ~ 30cm의 요철로 보고 각 파장길이별로 해석 경우를 정하였다. 요철의 깊이는 참고문헌 1과 3에 제시하고 있는 파상마모한계 0.3mm와의 비교를 위하여 마모한계의 전·후의 값을 설정하였다.

- 차량 주행속도 : 300km/hr
- 파장길이 : 30mm, 60mm, 90mm, 150mm, 300mm
- 요철깊이 : 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm

3. 해석결과

레일의 요철이 궤도부담력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동적윤중의 변화량을 분석하였다. (그림 4)는 요철에 의해 증가되는 윤중의 최대값의 변화경향을 보여주고, (그림 5)는 윤중이 감소되는 경우, 즉 윤중빠짐의 정도를 보여준다. 두 경우 모두 단파장 영역에서는 요철의 깊이가 깊어질수록 요철의 길이가 증가할수록 윤중의 변동량이 증가하는 것을 보여주고 있다. 그러나 점선으로 표시된 장파장 요철의 경우에는 요철의 깊이가 깊어질수록 윤중의 변동량은 커지지만 요철의 길이가 증가함에 따라 윤중의 변동량이 줄어들음을 알 수 있다. 즉 일정범위 이상을 넘어선 장파장 영역에서는 요철의 한도를 단파장 영역보다 더 크게 결정할 수 있음을 보여준다.



0.4

그림 4. 요철에 따른 최대 윤중값의 변화

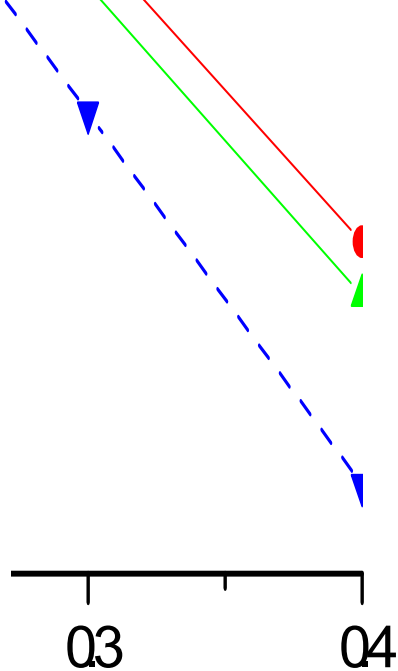


그림 5. 요철에 따른 최소 윤증값의 변화

(표 3)은 요철에 의해 발생하는 동적윤증과 정적윤증의 비를 나타낸 것으로 궤도에 가해지는 하중의 동적증폭계수라고 할 수 있다. 표에서 알 수 있듯이 정적윤증에 비해 최대 약 50% 정도 증가함을 알 수 있는데, 이는 일본 신간선 유도상궤도에 적용하고 있는 동적증폭계수의 최대치인 80%보다 작은 값을 보인다. 즉 요철의 길이가 300mm이고 깊이가 최대 0.4mm인 경우에는 설계충격계수보다 작은 윤증 증가량을 보이므로 현재 유럽 등지에서 사용하고 있는 요철 한계인 0.3mm의 값은 동적윤증의 증가측면에서만 본다면 합리적인 기준으로 사료된다. 그러나 요철의 한계는 동적윤증의 증가량에 의해서만 결정되는 것이 아니라 소음과 진동, 승차감, 윤증빠짐 등 여러 가지 측면에서 결정되는 것이므로 이에 대한 종합적인 검토를 통하여 결정되어야 할 것이다.

표 3. 레일 요철에 의한 윤증의 동적증폭비

요철깊이(mm) \ 요철길이(mm)	30	60	90	150	300
0.0	9.76%	9.76%	9.76%	9.76%	9.76%
0.1	11.67%	16.45%	17.44%	21.33%	14.48%
0.2	19.82%	22.79%	28.12%	33.82%	24.20%
0.3	26.21%	28.73%	36.35%	42.49%	31.65%
0.4	31.65%	34.86%	43.28%	49.16%	37.77%

(표 4)는 레일의 요철에 의한 윤증의 감소비 즉 윤증의 빠짐의 정도를 정적윤증과의 비로서 표현한 것이다. 레일의 요철에 의한 지나친 윤증의 감소는 탈선을 유발할 우려가 있으므로 엄격한 관리가 필요하다. 일본에서는 차량의 탈선방지를 위하여 윤증빠짐의 한도를 평균윤증의 60%로 정하고 있는데, (표 4)에서 알 수 있듯이 최대 94%의 윤증감소율을 보여주고 있어 요철의 발생이 차량의 탈선안전성에 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다. 정적윤증을 평균으로 보는 것이 다소 보수적이라고 하더라도 요철의 깊이가 0.3mm가 넘게 되면 윤증의 감소율이 일본의 제한규정을 상회하는 경우가 발생하므로 레일의 요철관리에 각별한 주의를 기울여야 함을 알 수 있다.

표 4. 레일 요철에 의한 윤중의 감소비

요철깊이(mm) \ 요철길이(mm)	30	60	90	150	300
0.0	8.26%	8.26%	8.26%	8.26%	8.26%
0.1	15.69%	21.45%	24.45%	20.49%	16.17%
0.2	25.77%	38.00%	41.48%	45.07%	26.85%
0.3	35.96%	58.03%	61.14%	69.54%	37.64%
0.4	46.03%	78.05%	81.65%	94.15%	48.31%

4. 결론

레일의 요철발생 정도에 따른 궤도 부담력의 증가를 알아보기 위해 윤중 변동량을 분석하여 보았다. 그리고 윤중변동량을 통하여 요철에 의한 궤도의 충격계수 및 탈선방지를 위한 윤중빠짐 허용한도와 비교 분석을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 단과장 영역에서는 요철의 깊이가 깊어질수록 요철의 길이가 증가할수록 윤중의 변동량이 증가하지만, 장과장 요철의 경우에는 요철의 깊이가 깊어질수록 윤중의 변동량은 커지지만 요철의 길이가 증가함에 따라 윤중의 변동량이 줄어들 수 있었고 이를 통하여 일정범위 이상을 넘어선 장과장 영역에서는 요철의 한도를 단과장 영역보다 더 크게 결정할 수 있음을 알 수 있었다.
- ② 레일요철에 의한 동적증폭비에 대한 분석을 통하여 0.3mm의 마모한도를 준수하는 경우에, 레일의 요철에 의한 윤중의 증가에 따른 문제점은 발생하지 않는 것을 알 수 있었다.
- ③ 윤중감소율에 대한 분석결과, 요철한도를 준수하더라도 일본의 윤중감소율 한도기준을 초과하는 경우가 발생할 수 있으므로 레일의 요철관리에 주의를 기울여야 함을 알 수 있었다.
- ④ 본 연구에서 사용된 모델과 궤도의 물성치가 현재 운행되고 있는 궤도의 상태를 대표하는 것이 아니므로 향후 보다 다양한 궤도조건과 차량운행 조건에 대한 해석을 수행하여 국내에 적용할 수 있는 요철 한도기준을 수립할 필요가 있다.

5. 참고문헌

- 1) “레일연마의 효과 및 경제성 분석”, 한국철도선로기술협회
- 2) “고속철도 궤도유지관리설명서(III)”, 철도청
- 3) “고속철도 운영을 위한 철도시설정비사업 및 기존선 전철화 사업 기술자문(3단계)” 연구보고서, 2004, 철도청
- 4) “Modern Railway Track, 2nd ed.” 2001, Coenraad Esveld, MRT Production
- 5) "Railway Engineering", 1995, V.A. Profillidis, Avebury Technical
- 6) M.Ishida, S.Miura, K.Matsuo, 1997, "Vertical Behaviour in Track Dynamics due to Rail Corrugations ", RTRI Report, Vol.11 No.2, February 1997