

열차주행안전을 고려한 궤도패드의 최소 수직 스프링계수 결정에 관한 연구

A study on determining the minimum vertical spring stiffness of track pad considering running safety.

김정일*
Kim, Jeong-il

양신추**
Yang Sin-Chu

김연태***
Kim, Yun-Tae

ABSTRACT

This study presents the minimum spring stiffness of resilient track pad considering the safety of running train. A nonlinear static 3-D finite element is used for the modeling of railway superstructure, especially for the reflection of nonlinear resistance of rail fastening system. Moreover, ballast is considered as an elastic foundation. As the input load, eccentric wheel and lateral force are used and they are derived from "Lateral-force/Wheel-load Estimation Equations". Analysis results are compared with following two values : allowable lateral displacement of rail head (derived from the geometrical derailment evaluation of wheel/rail) and operation standard value (derived from the field test results of track).

1. 서론

차량을 직접 안내하는 레일을 포함하고있는 궤도는 철도의 고속화와 관련하여 주행속도와 함께 증대하는 율중변동의 제한이 궤도유지관리와 소음·진동의 제한을 위한 관건이다.

율중변동은 지금까지의 연구에 의해 차륜·레일간 요철의 진폭에 비례하고, 스프링 하 질량, 레일강성 및 레일지지 스프링계수에 관계하며 열차의 주행 속도에 비례한다.

속도 향상에 따라 증가하는 율중 변동의 경감책에는 궤도의 감쇠에 따라 폭이 있지만 다음의 3 가지가 있다.
① 차륜의 스프링 하 질량의 저감 ② 궤도 스프링계수의 저하 ③ 차륜/레일간 요철의 저감

일본 신간선의 경우 이러한 해석의 결과에 기초하여, 전반적으로 구조 대책을 취하는 입장에서, 레일 패드에 탄성을 주는 것과 레일 두께인 요철의 형상 관리를 행하도록 하였다.

레일 패드의 저 탄성화는 레일의 수직변형을 증가시키고 또한 이와 연성이 되어있는 레일 회전변형을 더욱 증가시킨다. 따라서 레일 패드의 저 탄성화를 위해서는 열차의 주행안정성을 확보시키는 레일 회전 횡변위 해석이 절대 필요하다. 레일 회전 횡변위 해석에 영향을 미치는 인자로는 율중과 횡압, 레일의 비틀림 강성, 회전 에 대한 비틀림 지지강성계수로 볼 수 있다.

본 논문은 고속철도선로에서 적용되고 있는 사각도상 궤도와 콘크리트 부도상궤도를 대상으로 하여 패드의 저 탄성화에 대한 최소 수직 스프링상수를 결정하기 위해, 레일 회전 횡변위 해석을 실시하였다. 레일 회전 횡변위 해석에서의 입력하중은 곡선부에서의 율중·횡압 추정식에서 결정된 하중을 적용하였다.

* 철도전문대학원 석사과정, 한국철도기술연구원 파견연구원, 학생회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 서울산업대학교 교수, 정회원

2. 유중·횡압의 추정식

본 연구에서의 유중·횡압의 추정식은 철도차량이 곡선선로를 통과할 때의 유중·횡압의 발생 메커니즘의 이론과 실험데이터의 해석결과를 기초로 구성되어, 곡선 바깥 차륜의 횡압과 유중의 추정치를 결정한다.

2.1 바깥레일·안쪽레일 유중의 추정식

원심력, 선로면의 비틀어짐 및 공기 스프링의 비틀어짐의 세 가지 요소를 고려하여, 안쪽 및 바깥쪽 레일의 유중은 다음 식으로 구해진다.

$$P_i = \overline{P}_i + \Delta P - F_1 \times \frac{\eta}{\tan 60^\circ} \quad (1)$$

$$P_o = \overline{P}_o - \Delta P + F_1 \times \frac{\eta}{\tan 60^\circ} \quad (2)$$

P_o : 바깥 레일쪽 유중(kN) P_i : 안쪽 레일쪽 유중(kN)

\overline{P}_o : 바깥레일쪽 유중 정상분(kN)

\overline{P}_i : 안쪽레일쪽 유중 정상분(kN)

ΔP : 평면성 굴절에 의한 정적 유중감소(kN)

F_1 : 공기스프링의 비틀림에 의한 유중 횡압(kN)

η : F_1 의 유중성분의 보정계수로, β 에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$\eta = 1 \quad (\beta > 0), \quad \eta = 0 \quad (\beta \leq 0)$$

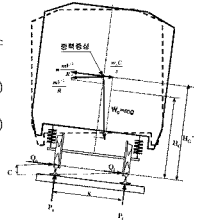


그림1. 곡선부에서의 유중의 변화

2.2 횡압추정식

안쪽 레일 측의 마찰력에 의한 전향횡압, 원심력 및 공기 스프링의 뒤틀림, 외력에 의한 유중횡압, 궤도틀림 및 이음부 충격에 의한 유중횡압분 등을 고려하여 바깥 레일 측 횡압은 다음식으로 구할 수 있다

$$Q_o = \overline{Q}_i + \Delta Q_{AS} + \Delta Q_{AD} + Q_{wsp} \quad (3)$$

Q_o : 외측측 횡압 (kN)

\overline{Q}_i : 내측측 횡압 정상분 (kN)

ΔQ_{AS} : 유중 횡압 정상분 (kN)

ΔQ_{AD} : 궤도틀림에 의한 유중 횡압 변동분(kN)

ΔQ_{wsp} : 레일이음부 횡압 변동분(kN)

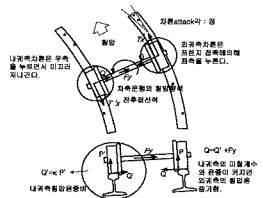


그림2. 곡선 전향횡압 발생 메커니즘

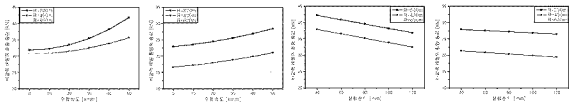
2.3 유중·횡압의 추정식의 민감도 분석

본 민감도 분석에서 해석변수에 대한 유중과 횡압의 영향을 평가해 보기 위하여 사용된 차량측 및 궤도측의 매개변수(parameter)의 기본 제원은 다음 표 1과 같다.

다음의 기본 세우으로 민감도 분석을 위하여 특정 매개변수를 변화하면서 유중·횡압의 영향을 검토하는 경우 타 매개변수는 표 1의 기본 세원값과 동일한 값으로 변화가 없는 것으로 가정하였다.

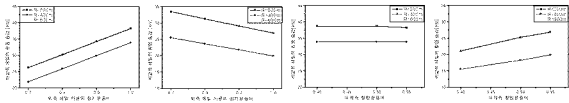
표 1. 용중·횡압 추정을 위한 기본 계원

기본조건 매개변수	단위	수치	기본조건 매개변수	단위	수치
절적축중	kN	80	주행속도	km/h	40
외측레일의 정지용중비	-	1.0	궤간	m	1.435
차륜유효중심높이	m	1.76	궤트	mm	100
축거	m	2.1	궤트 제감배율	-	650
대차중심거리	m	12.4			
좌우 1차현수장치 스프링 강직	m	1.97	축거 평면성 틀림	mm	5m마다 측정
좌우 2차현수장치 스프링 강직	m	1.95			
좌우 접촉점 강직	m	1.5	대차중심간 평면성틀림	mm	2.1
상하 1차현수장치 스프링정수 /1축당	kN/m	1060	축틀림의 표준편차	mm	1.5
상하 2차현수장치 스프링정수 /대차원축당	kN/m	284	윤축횡압변동계수	1/mm/(km/h)	0.00015
2차 현수장치의 전후강성 /대차원축당	kN/m	71	곡선반경	m	200 ~ 600



(a)주행속도의 변화에 대한 응답

(b)설정궤간의 변화에 대한 응답



(c)바깥쪽 레일/차륜의 정지용중비 변화에 대한 응답

(d)내측축 횡압윤중비 변화에 대한 응답

그림3. 용중·횡압 추정식의 민감도

3. 차륜/궤도 인터페이스

궤도패드의 저탄성계수화에 따른 열차의 주행안전을 확보하기 위한 레일 두부면위의 허용량에 대해서 검토를 하면 다음과 같다. 그림4의 윤축과 좌우레일의 관계로부터 고속철도궤도의 궤간확대의 허용치를 α 는,

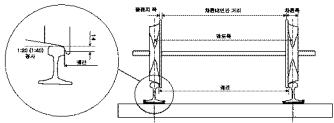


그림4 표준궤간의 적선궤도에 대한 윤축과 궤도치수

$$\alpha = (a + b + c) - (G + g + \delta) = 72 - \delta \quad (4)$$

a: 차륜내면간 거리(최소치 1354mm) b: 차륜 름의 폭(최소치 135mm)

c: 차륜 플랜지 두께(최소치 28mm) G: 궤간(1435mm)

g: 궤간틀림(최대치 -10mm)

δ 를 레일(UIC60) 두부폭 74.32mm의 1/2의 37.2mm로 하면

$\alpha=34.8 \text{ mm}$

로 된다. 특히 안전율을 3.0으로 하면

$\alpha=11.6$

따라서 양측에 압축하는 것과 같은 가장 심한 상황을 상정하면 편측 레일의 두부좌우 변위의 허용치는 레간 확대량의 1/2인 5.8mm정도로 된다.

4. 고속철도에서의 열차주행안정성을 고려한 직경 레일 스프링 계수 선정

4.1 열차 주행안정성평가 항목 및 기준

주행안정성 평가를 위해 일본 고속철도 신설선에서 시험레도의 성능시험 등에 대한 주행관정표준(안)을 적용하였다(표2). 이 관정의 각종수치는 일본의 동북 신간선의 소산지구, 북상지구 등에서 각종 시험레도의 성능확인시험을 통해 얻어진 많은 데이터를 참고로 하여 설계지에 대한 고찰 및 수정을 통해 주행관정에 사용하는 표준(안)으로 제안한 것이다. 여기서 표준값 및 참고값은 다음 의미를 지닌다.
표준값: 종래의 측정값, 설계값을 고려하여 이를 넘는 경우에는 상세조사를 해야하는 값.
참고값: 보통은 이 범위내에 있는 값

표2 일본 신간선의 주행관정기준

항 목	레도유형	슬래브 레도		유도상 레도	
		표준치	참고치	표준치	참고치
유중 감소율	최대치	255 kN	200 kN	300kN	200kN
	최소치	25 kN	35 kN	25 kN	35 kN
휨 압	레일 수직 변위	68 kN	40 kN	68 kN	40 kN
	슬래브, 침목수직변위	3mm	2mm	4mm	3mm
레일적하	슬래브, 침목수직변위	1mm	0.5mm	3mm	2mm
	슬래브, 침목횡변위	1mm	0.5mm	2mm	1mm
레일과 슬래브, 침목 상대변위(경사)	슬래브, 침목전후변위	1mm	0.5mm	2mm	1mm
	레일용력(전진쪽)	2mm	1.5mm	2mm	1.5mm
레일계결장치 스프링용력(전진쪽)	레일계결장치	300MP	200MP	300MP	200MP
	스프링용력(전진쪽)	450MP	300MP	270MP	180MP

4.2 고속철도에서의 유중 · 휨압의 추정값

고속철도의 최저곡선반경인 $R=7000\text{m}$ 구간에 고속철도차량을 대상으로 유중 · 휨압의 추정값을 계산하기 위해 표3의 물성치로 해석을 한 결과 주행속도 300km/h에서 $W_0=170\text{kN}$, $\gamma=1$, $\kappa=0.55$ 조건에서 유중은 최대87kN, 휨압은 42kN으로 평가되었다.

표3. 유중 · 휨압 추정을 위한 입력 물성치

기 호	단위	항 목	동력 대차	일반 대차	기 호	단위	항 목	동력 대차	일반 대차
W_0	kN	정적중량	170	170	2α	m	축간거리	1.5	1.5
γ	-	바깥쪽 레일/차륜의 정자윤증비	1.0	1.0	$2c$	m	대차중심간 거리	9.35	9.35
v	m/s	주행속도	300	300	a_{zc}	-	캠트체감배율	3500	3500
G	m	레간	1.435	1.435	l_c	m	캠트체감분을 제외한 대차중심간 평면성 굴절	구조분만	구조분만
C	m	캠트	0.130	0.130	l_a	m	캠트체감분을 제외한 축거 평면성 굴절	0.003	0.003
R	m	곡선반경	7000	7000	k	kN/m	2차 현수장치전후강성	300	340
g	m/s^2	중력가속도	9.8	9.8	σ_x	mm	레도종틀빔 안전한도	1.7	1.7
H_g	m	차량유효중심높이	1.65	1.65	k_Q	1/mm/(km/h)	표준레차 승차감한도	1.2	1.2
							윤추휨압변동계수	1.5E-4	1.5E-4

4.3 고속철도에서 궤도 패드의 적정스프링계수의 산정

1) 자갈도상 궤도

고속철도 R=7000m의 곡선부 조건에서 도출한 추정 율중·칭압을 체결장지간의 60cm, 선로방향길이 9m의 그림5 (a)와 같은 궤도모델에 레일패드 스프링계수와 침목지지계수를 변화시켜가면서 레일 두부에 작용시켜 레일두부의 좌우 변위 및 저부 수직 변위등을 조사하였다. 궤도구성품의 제원과 물성치는 표4와 같다.

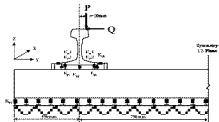
자갈궤도의 침목지지계수를 200MN/m/m을 기본으로 하여 해석을 실시한 결과 하중작용점 주위의 저점형상은 그림6 (a)와 같다. 레일의 변형은 그림7과 같이 레일패드의 정수가 90 MN/m인 경우에 레일 회전각이 0.0078rad, 레일 두부 변위량이 1.34mm이지만 60MN/m가되던 각각 0.0085rad, 1.5mm가 된다.

표2의 주행관장기준에서 편측 레일의 좌우 변위의 참고치의 허용치 1.5mm를 고려하면 침목지지계수가 200MN/m/m일때 레일 패드 스프링계수의 최저값은 60MN/m이상 이어야 한다. 또한 침목지지계수를 변화시켜가면서 레일 패드 스프링계수의 값 60MN/m에 대해 레일의 변형을 조사해 본 결과 그림8과 같이 침목지지계수가 200MN/m/m이상인 1.5mm권이 유지되지만 200MN/m이하인 경우에는 허용치를 벗어나고 있다.

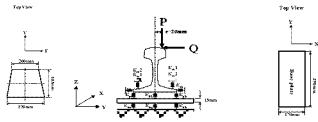
이상의 결과로 침목지지계수 200MN/m/m이상의 유도상 궤도에서 최저 레일패드 스프링계수가 60MN/m 이상임을 확인하였고, 최저불성 궤도에 상시 율중85kN과 최대칭압 68kN의 체결구 최대설계칭압을 작용시켜 해석을 한 결과 레일 두부 좌우변위는 3.43mm가 발생하여 허용치인 5.9mm이내에 있어 안정성이 확보됐다.

표4. 고속철도 유도상궤도의 구성품과 물성치

궤도 구성품	형상	비고
레일	UTC 60	-
체결클립	c-clip	k=1.0MN/m
침목	콘크리트 PC 침목	$f_{ck} = 600 \text{ kgf/cm}^2$
레일 패드	10mm 원주 고무패드 (Studded Rubber Pad)	k=80-120 kN/mm

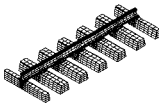


(a) 유도상궤도



(b) 콘크리트 무도상궤도의 체결구 시스템

그림5. 궤도시스템의 유한요소 모델

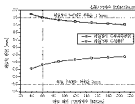


(a) 자갈도상 궤도

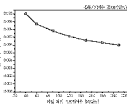


(b) 콘크리트 무도상궤도

그림6 궤도 유한요소 모델의 처짐(Specify factor 50)



(a) 레일 수평·수직변위



(b) 레일의 회전각

그림7. 레일의 수평 수직 변위

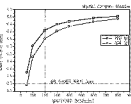
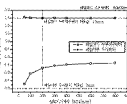


그림8. 침목지지계수의 변화에 따른 레일·침목의 변형

2) 고속철도용 콘크리트 부도상케도시스템의 해석

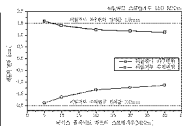
추진 유중·횡압을 베이스 플레이트 패드의 스프링계수를 5~40MN/m까지 변화시켜가면서 레일 두부에 작용 시켜보았다. 케도시스템의 재원과 물성치는 표5에 나타내었고 해석모델은 그림5 (b)와 같이 콘크리트의 강성 도상에 의하여 침묵의 수직차질이 미소하다고 보고 레일과 체결시스템만을 레일 강사모델에 구성하였다.

FE해석 결과로부터 그림6 (b)와 같은 레일의 치질을 확인하였다. 또한 UIC60레일의 두부좌우, 수직 변위량 그리고 레일 강사각을 그림9에 나타내었다. 이 결과 패드의 스프링계수가 20MN/m의 경우에 레일 회전각이 0.0071rad, 레일 두부 변위량이 1.23mm이지만 10MN/m으로 되면 작가 0.0082rad와 1.59mm로 된다. 표2의 주행환경기준에서 레일의 두부 좌우 변위의 허용치 1.5mm를 고려하면 스프링계수를 10MN/m이하로 한 경우, 레일 두부 좌우 변위는 이 허용치를 초과한다.

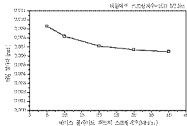
이상으로 도출된 최저 패드 탄성계수 10MN/m로 상시 유중85kN과 최대횡압 68kN의 체결구 설계최대 하중을 모델에 개하여 해석을 한 결과 레일 두부 좌우변위는 레간확대 허용치인 5.9mm보다 작은 3.086mm와 회전각 0.018rad가 발생하였다. 따라서 고속철도에 있어서 3E5 특성치의 베이스 플레이트 타입의 체결장치를 기본으로 한 콘크리트 부도상 케도의 베이스 플레이트 패드의 스프링계수의 한도는 10MN/m이상으로 된다.

3E5. 부도상케도의 구성품과 물성치

케도 구성품	스프링계수
UIC60 레일	Steel
체결볼립(sk115)	10MN/m
침묵(매립모노)	Concrete
레일 패드	150 MN/m
베이스플레이트	Steel
베이스플레이트 패드	22.5MN/m



(a) 레일 좌우·수직변위



(b) 레일 회전각

그림9 유중·횡압의 작용에 대한 레일의 변형

5. 결론

케도의 저탄성화를 위해 고속철도의 자갈도상케도와 콘크리트 부도상 케도에 대한 레일 회전 횡변위 해석을 실시하였다. 레일 회전 횡변위 해석에 적용된 유중과 횡압은 R=7000m 곡선부 선로조건에서의 유중·횡압의 추정식에서 결정된 하중을 적용시켰다. 해석결과 레일 패드의 저탄성화는 열차주행안정성의 확보를 위해 레일의 수직변위의 증가보다는 레일 두부 횡변위의 증가에 제한됨을 알 수 있었다. 레일 패드의 최저 수직 스프링계수는 자갈도상케도에서 침묵지지계수가 200MN/m 이상일 때 레일 패드 스프링계수의 최저값은 60MN/m 이상이고, 강성 기초위의 콘크리트 부도상 케도의 베이스 플레이트 패드의 경우 최저값은 10MN/m 이상임을 확인하였다.

후기: 본 연구는 건설교통부 도시철도 표준화 연구개발사업의 “도시철도 선로시스템 표준화” 과제에서 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 佐藤吉彦(1997), “新軌道力学”, 鐵道現業社
- 2) Coenraad Esveld(2001), “Modern Railway Track”, MRT-Production
- 3) 阿部則次の 4인 (1995. 12)“Development of Elastic Rail Fastening System for Anti-Vibration” RTRI REPORT Vol.9, No.12,
- 4) 内田雅夫의 3인 (2001. 4)“Evaluation of Derailment Safety Using Lateral-Force/Wheel-Load Estimation Equations” RTRI REPORT Vol.15, No. 4,