

자갈궤도에서의 도상 횡저항력 추정방법연구

Study on a Estimating Method of Lateral Ballast Resistance on Ballasted track

김인재* 김시철** 양신추*** 한상철****
Kim, In Jae Kim, Si Chul, Yang, Sin Choo Han, Sang Chul

ABSTRACT

Lateral resistance on ballasted track acts on lateral force under train running conditions and axial force resulting from rail temperature changes in order to enhance track stability on lateral direction. Lateral ballast resistance can be varied by the shape and material quality of sleepers as well as the size and shape of gravel. It can significantly decline by loosening ballast or exposure of sleeper during construction and maintenance. Although there are many approaches to estimate the lateral ballast resistance, defining an accurate distribution of the resistance on each side of sleeper enables to design sleepers with higher lateral ballast resistance and determine maximum permissible exposure of sleeper and allowable temperature change. In this paper, we have analysed existing formulas, assessed friction coefficient on each of sleeper, compared the formulas with measured value from HSL track, and determined tolerance of those formulas. In particular, we have applied a formula that can infer the lateral resistance during design and maintenance stages to the Gyeongbu HSL track.

1. 서론

자갈도상궤도에서 도상 횡저항력은 주행열차에 의한 횡압 및 레일온도변화에 의한 레일축력에 대하여 횡방향 안정을 확보하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 도상 횡저항력은 침목의 형상과 재질, 도상자갈의 입도와 형상 등에 따라 달라지며 신선 건설 및 유지보수 시 도상이완 및 침목노출에 따라 현저하게 저하된다. 도상횡저항력 산정방법은 여러 가지 방법이 있지만 이중 침목 각 면에서의 분담률이 명확히 규명되면 침목설계 시 도상저항력을 높일 수 있는 형상으로 설계가 가능하며, 도상작업 시 레일축력안정성을 고려한 침목노출한도 및 허용온도변화를 정할 수 있는 기술적 토대가 마련될 수 있다. 본 연구에서는 기존 시험식을 분석하고 침목 각 면의 마찰계수에 대한 적정여부를 확인 한 다음 해당식을 고속철도궤도에서 실측한 측정값과 비교하고 시험치의 적용한계에 대하여 연구하였다.

2. 도상횡저항력 분담이론

궤광의 횡변위와 도상횡저항력의 관계는 궤광의 횡변위에 대하여 도상횡저항력이 점증하는 부분과 더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되는 부분으로 나눌 수 있는데 궤도의 축력에 대한 안정은 점증하는 부

* 한국철도시설공단 궤도관리부장, 정회원
** 한국철도시설공단 시설관리팀 과장, 비회원
*** 한국철도기술연구원 궤도구조연구팀 책임연구원, 정회원
*** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 정회원

분에 의하여 궤도가 안정을 잃기까지의 변형도와 일정치에 도달한 후의 최종 도상횡저항력에 크게 영향을 받는다.

도상횡저항력에 대한 침목 각 면의 분담에 대하여 저면에는 궤광 중량에 의한 마찰력이, 단면에는 도상에 의한 수동토압이, 측면에는 주동토압이 작용한다고 전제하여 해석한 실험식[1]은 다음과 같다.

$$F = a \times W + b \times \gamma \times Ge + c \times \gamma \times Gs \tag{1}$$

여기서

- F : 침목 1정당 도상횡저항력(kg)
- W : 침목중량(궤강중량 포함, kg)
- γ : 도상의 단위용적중량(kg/cm³)
- Ge : 침목 단부면의 단면1차모멘트(cm³)
- Gs : 침목 측면의 단면1차모멘트(cm³)
- a, b, c : 계수

표 1 궤도형식별 계수치

구 분	a	b	c	비 고
PC침목 + 꺾자갈	0.75	29	1.8	
목침목 + 꺾자갈	0.75	29	1.3	
목침목 + 마모된 자갈	0.6	29	1.4	

식(1)에서 좌변의 제1항은 침목저면, 제2항은 침목단부면, 제3항은 침목측면의 도상횡저항력에 대한 분담을 나타낸다.

3. 침목 각 면의 도상저항력 검토

3.1 검토조건

참고문헌[2]에 의하면 시험 시 사용한 콘크리트침목은 협궤용 침목인 2.0m와 신간선 및 표준궤간 구간용 2.4m에 대하여 시행하였다. 국내 철도에서는 일반철도인 경우 콘크리트 침목의 길이가 2.4m이고 고속철도인 경우가 2.6m이다. 따라서 시험결과 중 적용성 측면에서 국내궤도와 유사한 신간선에 적용한 궤도형식을 대상으로 검토하였으며 이때의 궤도조건 및 침목 각 면의 분담력 시험치는 표 2와 같다.

표 2 궤도조건 및 침목 각 면의 분담력 시험치

구 분		60k PC	50k PC	비 고
궤도조건	레 일	60 KS	50 KS	
	침 목	PC L=2.4	PC L=2.4m	
	자 갈	꺾자갈	꺾자갈	
도상형상	저 면	614	519	
	저면+단부	1,866	1,241	
	저면+측면	1,691	1,123	
	표준 단면	2,863	1,845	
침목1정당 각 면 분담력	저 면 Fb	345(24%)	260(28%)	
	단부면 Fe	585(41%)	360(39%)	
	측 면 Fs	500(35%)	300(33%)	
침목1정당 도상 횡저항력		1,430 kg	920 kg	

3.2 침목저면저항력

침목저면에서의 저항력은 침목과 도상자갈 사이의 마찰저항으로 생기며 이 때의 마찰계수(μ)는 궤도의 저면저항력의 측정치(F_b)와 침목을 포함한 상부중량(W)과의 비로 표 3과 같이 구할 수 있다.

표 3 침목저면 마찰계수

구 분		60k PC	50k PC	비 고
저면저항력(F_b)		345 kg	260 kg	
중 량	침목 1정	325 kg	260 kg	
	레일 1.2m	73 kg	64 kg	
	기 타	26 kg	26 kg	
	계(W)	424 kg	350 kg	
$\mu = F_b/W$		0.814	0.743	평균 0.778

표 3에 의하면 60k PC와 50k PC 궤도의 마찰계수의 평균치는 0.778이므로 안전측을 고려하여 계수 a 는 0.75로 나타낼 수 있다. 따라서 침목저면의 저항력은 다음과 같이 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$F_b(PC) = 0.75W \quad (2)$$

3.3 침목단부면저항력

침목단부면에서의 저항력은 침목변위에 의한 도상자갈의 압력으로 나타낼 수 있다. 구조물 단위길이당 가해지는 수동토압은 다음과 같다.

$$E_p = \frac{\gamma H^2}{2} K_p \quad (3)$$

여기서, E_p : 전 수동토압

K_p : 수동토압계수

γ : 도상의 단위용적중량

H : 구조물의 높이

위의 식으로부터 도상자갈에 의한 압력을 구하는 식으로 가정하면 다음과 같다.

$$\frac{F_e}{B} = \frac{\gamma \cdot h^2}{2} K_e \quad (4)$$

F_e : 침목 1정당 단부면저항력

k_e : 침목단부면 저항계수

γ : 도상의 단위용적중량

h : 침목단부면높이

B : 침목단부면 환산폭

여기서 침목단부면의 환산폭은

$$B = \frac{2G_e}{h^2} \quad (5)$$

$$Ge : \text{침목단부면의 단면 1차 모멘트}(Ge = \int_0^h hdAt)$$

식(4)와 식(5)에 의해 Ke 관계식은 다음으로 나타낼 수 있다.

$$Ke = \frac{Fe}{\gamma \cdot Ge} \tag{6}$$

위 식에 의거 침목단부면 마찰계수를 계산하면 표 4와 같다.

표 4 침목단부면 마찰계수

구 분	60k PC	50k PC	비 고
단면저항력(Fe)	585 kg	360 kg	
단부면높이(h)	25.46 cm	21.85 cm	
$Ge = \int_0^h hdAt$	9,440	6,800	
$B = \frac{2Ge}{h^2}$	29.13	28.49	
도상단위중량(γ)	0.0019 kg/cm ³	0.0019 kg/cm ³	
$Ke = \frac{Fe}{\gamma \cdot Ge}$	32.6	27.9	평균 30.25

표 4에서 보는 바와 같이 마찰계수 평균치가 30.25임을 감안하여 근사치로 나타내면 식(7)과 같다.

$$Fe(PC) = 30\gamma Ge \tag{7}$$

3.4 침목측면저항력

침목측면의 저항력은 측면에 도상자갈의 주동토압이 가해진 상태에서 변위에 따른 마찰저항을 고려할 수 있다. 침목 측면에 가해진 도상자갈의 압력은 침목높이의 제곱에 비례한다고 보면 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\frac{Fs}{l} = \frac{\gamma \cdot H^2}{2} Ks \tag{8}$$

Fs : 침목 1정당 측면저항력

ks : 침목측면 저항계수

γ : 도상의 단위용적중량

l : 침목측면길이

B : 침목측면 환산높이

여기서, 침목측면 환산높이(H)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = \sqrt{\frac{2Gs}{l}} \tag{9}$$

$$G_s : \text{침목측면의 단면 1차 모멘트}(G_s = \int_0^h hdAt)$$

따라서 식(8)와 식(9)에 의해 K_s 관계식을 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$K_s = \frac{F_s}{\gamma \cdot G_s} \tag{10}$$

위 식에 의거 침목측면 마찰계수를 구하면 표 5와 같다.

표 5 침목측면 마찰계수

구 분	60k PC	50k PC	비 고
측면저항력(F_s)	500 kg	300 kg	
측변장(l)	120×4 cm	120×4 cm	
$G_s = \int_0^h hdAt$	32,661×4 cm ³	22,704×4 cm ³	
$H = \sqrt{\frac{2G_s}{l}}$	23.33	19.45	
도상단위중량(γ)	0.0019 kg/cm ³	0.0019 kg/cm ³	
$K_s = \frac{F_s}{\gamma \cdot G_s}$	2.01	1.74	평균 1.875

표 5에 의해 60k PC와 50k PC케도의 침목측면저항계수는 평균 1.875이나 근사값으로 1.85로 나타낼 수 있다. 따라서 침목측면의 저항력은 다음과 같이 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$F_s(PC) = 1.85\gamma G_s \tag{11}$$

3.5 도상형저항력의 계산식

이상과 같이 검토한 결과를 토대로 침목 1정당 도상형저항력을 나타내면 식(1)과 같으며 계수 a, b, c는 식(2), (7), (11)에 의거 요약하면 다음 표와 같다.

표 6 도상형저항력 수정 마찰계수

구 분	a	b	c	비 고
콘크리트침목케도	0.75	30	1.85	

4. 고찰

4.1 시험치와 계산치 비교

시험케도 구조형식별로 시행한 시험치와 기존식에 의한 계산치(협케포함), 협케의 시험결과를 제외하고 도출된 계산식에 의한 결과를 비교하여 보면 표 7과 같다. 표 7을 보면 60k PC인 경우 시험치와 계산치

에서 기존계수 적용한 경우는 약 10%, 수정계수 적용한 경우는 약 8%정도 계산치가 적게 나온 반면 50k PC인 경우에는 기존계수가 3%, 수정계수가 5%정도 높게 나왔다. 이러한 결과를 볼 때 기존계수와 마찰계수가간의 평균값으로 산출된 수정 계수의 계산치 차이는 약 2%로 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있었다.

표 7 도상횡저항력 시험치와 계산치 비교

구 분		60k PC			50k PC			비 고
		실측치	기존계수 이용하여 계산	수정계수 이용하여 계산	실측치	기존계수 이용하여 계산	수정계수 이용하여 계산	
침목 각 면 저항력 (1정당)	저 면(Fb)	345	318	318	260	262	262	
	단부면(Fe)	585	520	538	360	375	387	
	측 면(Fs)	500	447	459	300	310	319	
도상 횡저항력 F (침목 1정당)		1,430	1,285	1,315	917	947	968	

4.2 고속철도 궤도에서의 검토

도상횡저항력의 측정은 부설초기인 2000년부터 시운전이 본격적으로 시행된 2003년까지 측정하였으며 이는 안정화 초기단계에서 안정화 단계까지의 도상저항력 변화를 나타낸 것으로 표 8과 같다.

표 8 도상횡저항력 측정치[3]

구 분		침목이동량(mm)					비 고
		0	0.5	1.0	1.5	2.0	
토공	'00	0	344	419	461	481	
	'01	0	387	461	515	549	
	'03	0	661	804	857	879	
교량	'00	0	359	434	493	521	
	'01	0	425	535	607	653	
	'03	0	502	640	694	716	

도상횡저항력을 계산하기 위해서는 경부고속철도에서 사용한 침목의 단면 및 궤도 상부 중량, 단면1차 모멘트가 필요하며 시용된 자료는 그림1, 표 9 및 표 10과 같다.

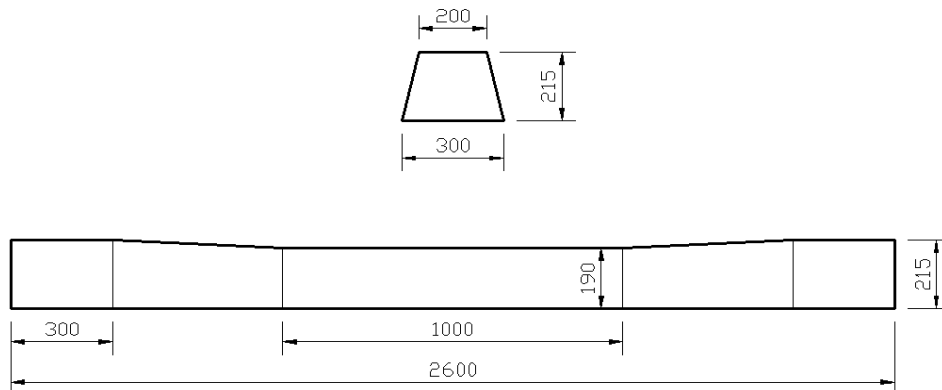


그림 1 고속철도용 PC침목의 단면도

표 9 궤도 상부 중량

구 분	계	침목1정	레일 1.2m	체결구 등
중 량	390kg	296kg	72kg	22kg

표 10 침목의 단면1차모멘트

구 분	산 식	단면1차모멘트 (cm ³)	비 고
침목단부 (Ge)	$Ge = \int_0^h hdAt = \int_0^{21.5} 25hdA$	5,778	$\frac{20+30}{2} = 25$
침목측면 (Gs)	$Gs = \int_0^h hdAt = \int_0^{20.2} 130hdA \times 4$	106,090	$\frac{21.5+19}{2} = 20.2$

궤도부설직후 도상단위 중량은 약 0.0016kg/cm³이며 통과톤수 및 다짐량 증가로 서서히 안정화 되면서 도상단위중량은 0.0019kg/cm³정도까지 향상된다. 따라서 경부고속철도 궤도에서의 도상횡저항력 계산시 단위중량을 구분하여 기존 시험식에 의거 산출하였으며 그 결과는 표 11과 같다.

표 11 경부고속철도궤도에서의 도상횡저항력 계산치

구 분		단위중량별		비 고
		$\gamma = 0.0016\text{kg/cm}^3$ (안정화 전)	$\gamma = 0.0019\text{kg/cm}^3$ (안정화 후)	
침목 각 면 저항력 (1정당)	저 면(Fb)	293	293	
	단부면(Fe)	268	318	
	측 면(Fs)	305	363	
도상 횡저항력(침목 1정당)		866	974	
도상 횡저항력(kg/m)		519	584	

표 8과 표 11을 검토하여 보면 부설초기로서 안정화가 되기전인 '00년도 도상횡저항력은 토공 481kg/m, 교량 521kg/m이고, 도상단위중량 $\gamma=0.0016\text{kg/cm}^3$ 인 경우로 하여 계산한 값은 519kg/m로서 실측치와 계산치는 거의 일치함을 알 수 있다.

안정화가 된 '03년도의 도상저항력은 토공 879kg/m, 교량 716kg/m인 반면 도상단위중량이 $\gamma=0.0019\text{kg/cm}^3$ 로 하여 계산된 값은 584kg/m로서 최대 50% 정도의 차이가 난다.

이는 보수과정에서 도상어깨의 보강 및 다짐조건들이 시험장치와 다르기 때문으로 분석되며 안정화 후의 도상저항력 추정식으로는 부적합한 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 궤도의 안정을 위하여 중요하게 검토하고 관리하여야 하는 도상횡저항력을 설계단계 및 유지보수 시 유추할 수 있는 기존의 시험식에 대하여 검토하였으며 경부고속철도 궤도에서의 적용을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 침목 각 면에 작용하는 마찰계수는 침목의 길이나 재질에 따라 달라지는 값이 도상횡저항력에 미치는 영향이 2%정도 이내로 오차가 크지 않기 때문에 기존식을 국내철도에서 적용이 가능하다.
- (2) 고속철도 궤도에 적용한 결과 부설초기에는 계산치와 실측치가 거의 일치하여 활용도가 높은 반면 안정화된 이후에는 편차가 커 적용이 곤란하다.
- (3) 시험식은 부설 초기 안정성 검토와 도상작업 시 침목 노출 정도에 따른 한계 규정에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

[참고문헌]

1. 左藤吉彦, 梅原利之(1995년), 線路工學, 일본철도시설협회, p287~288
2. 左藤吉彦, 宮井 徹(1976년), 各種有道床まくらぎの道床横抵抗力とその特性, 일본철도기술연구소
3. 한국철도건설공단(2003.12), 시운전시 궤도 노반 시설물의 성능검증, p176~197