

자갈궤도 종저항력의 비선형성에 대한 고찰

Nonlinear Behaviors for the Longitudinal Resistance of Ballast Tracks민경환*, 박상준*[†], 장태영*, 임남형**Kyung-Hwan Min*, Sang-Jun Park**[†], Tae-Young Jang**, Nam-Hyoung Lim^{†**}

Abstract For the longitudinal resistance of ballast tracks, current codes use the elastic-perfect plastic model with a limit displacement. This method is efficient in deriving the maximum resistance for large displacement, but it may be irrational for the range of actual displacement. Therefore, it is more reasonable to apply the strain hardening models.

Keywords : Longitudinal resistance, Ballast track, Strain hardening, Plastic model

초 록 자갈궤도의 종저항력에 대한 규정은 한계 변위를 중심으로 탄성완전소성 모델을 사용하고 있다. 이러한 방법은 큰 변위에 대해서 최대 종저항력을 도출하는 과정에서는 효율적이지만, 실제 발생하는 변위의 범위에 대해서는 비합리적일 수 있다. 이에 따라 변형 경화현상을 반영할 수 있는 모델을 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.

주요어 : 종저항력, 자갈궤도, 변형 경화, 소성 모델

1. 서 론

철도 궤도의 종저항력에 대한 규준은 국내 KR C-08080[1] 및 UIC Code 774-3[2]이 동일하게 bilinear 모델을 사용하고 있고, 이는 Fig. 1 과 같이 탄성완전소성(elastic and perfect plastic)의 형태를 이루고 있다. 이에 대해서 UIC Code 774-3에서는 Fig.2와 같이 초기 비선형으로 저항력이 증가하고 이후 수렴하는 형태의 곡선을 통해 설정이 된 것으로 설명하고 있다[2]. 반면 실제 거동을 통해서 bilinear 모델을 도출하는 과정에 대해서는 정확한 이력을 알기가 어려운 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 기존의 연구 및 실험 결과를 통해 실질적으로 발생하는 범위에서의 궤도 종저항력-증방향 변위의 관계를 알아보려고 한다.

† 교신저자: 충남대학교 공과대학 토목공학과(nhr im@cnu.ac.kr)

* 충남대학교 철도연구소

** 충남대학교 공과대학 토목공학과

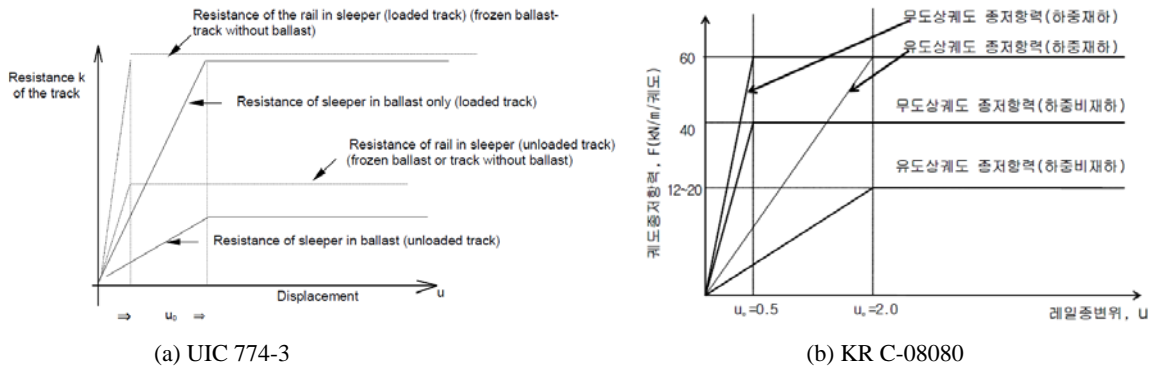


Fig. 1 Bilinear function of longitudinal resistance of the track and displacement of rails

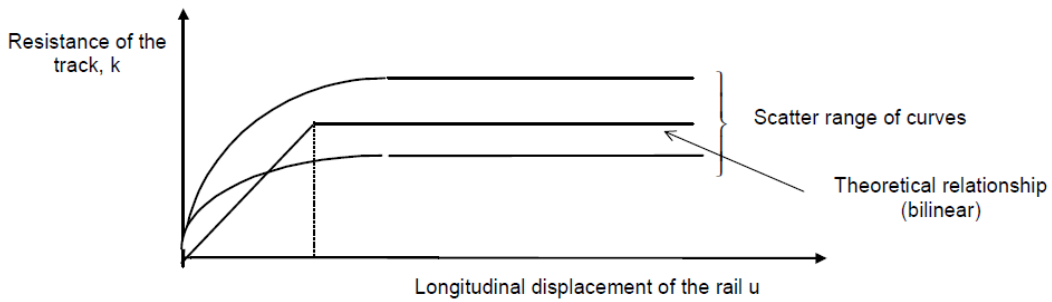


Fig. 2 Longitudinal resistance of the track as a function of longitudinal displacement

2. 궤도의 종방향 저항력과 종방향 변위의 관계

2.1 기존 문헌 및 사례

UIC Code의 기반이 되는 실험 자료는 1997년 TU Delft에서 수행된 실험이 대표적이라고 추정된다. 해당 연구에서는 장대레일이 적용된 자갈궤도의 횡방향 저항력에 대한 실험적 연구가 주 목적이지만, 동일 연구에서 측정된 종방향 저항력의 대표적인 실험 결과는 Fig. 3과 같다[3][4]. Fig. 3에서 보인 바와 같이 수직하중의 크기에 따라서 종방향 저항력이 점차 커지는 경향을 보이며, 10~15mm의 종방향 변위가 발생한 이후에 종방향 저항력이 수렴하는 것으로 나타났다. 최근에 국내에서 수행한 실험 결과에서도 Figs. 4~5와 같이 종저항력이 초기에 비선형으로 증가하고 이후에 점차 수렴하는 형태를 보이는 것으로 보고되고 있다 [5][6].

이러한 기존의 실험 사례를 볼 때 현재 규준에서 제시하고 있는 수직하중 크기의 영향이 고려되고 있지는 않으나 종방향 저항력의 최대값은 합리적인 범위를 보이는 것으로 판단된다. 이에 따라 실험 결과를 이용하여 최대 종저항력을 도출하고, 한계 변위가 설정된다면 기존의 bilinear 모델을 도출할 수 있다. 실험 결과에서 종저항력은 초기에 비선형으로 증가하고 이후 수렴하는 형태를 보이므로, 이를 모사하는 방법 중 식 (1)과 같이 일반적으로 사용하는 지수함수 형태로 회귀분석을 할 수 있다.

$$R = F_{\max} (1 - e^{-k\delta}) \quad (1)$$

여기서, R = 궤도의 종저항력 (kN)

F_{\max} = 최대 종저항력 (kN)

k = 매개변수

δ = 궤도의 종방향 변위 (mm)

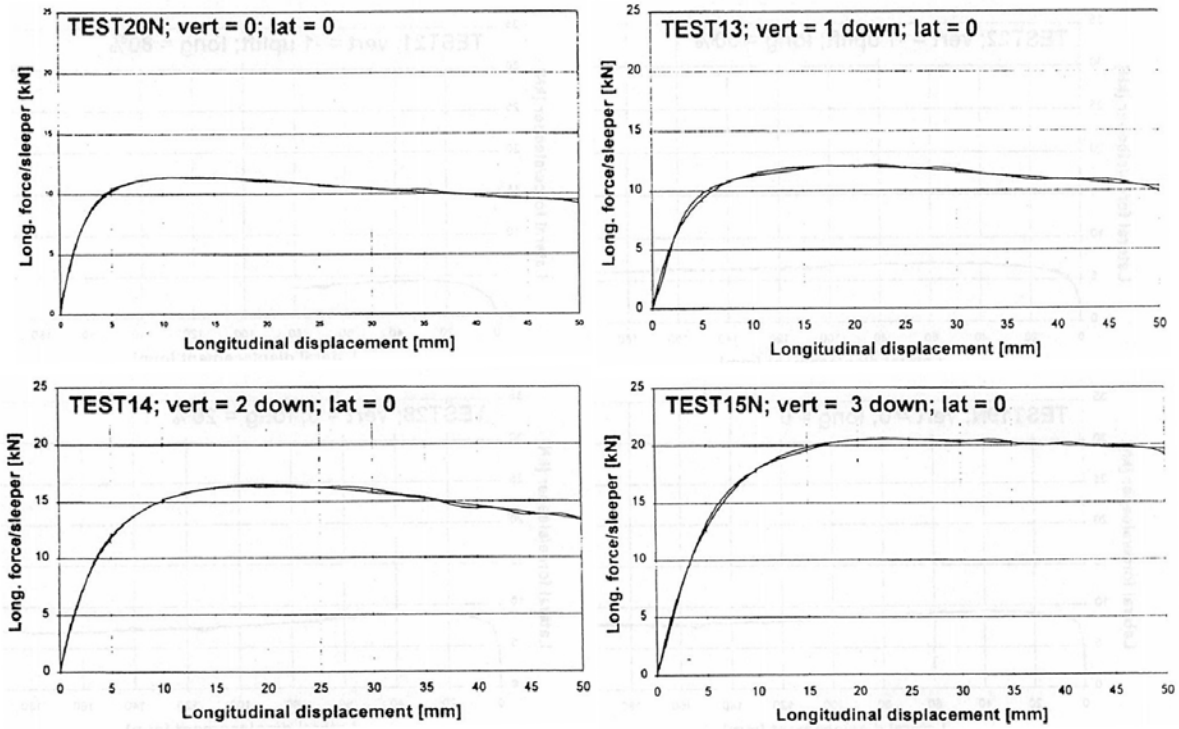


Fig. 3 Test results of the TU-Delft study for the longitudinal resistance

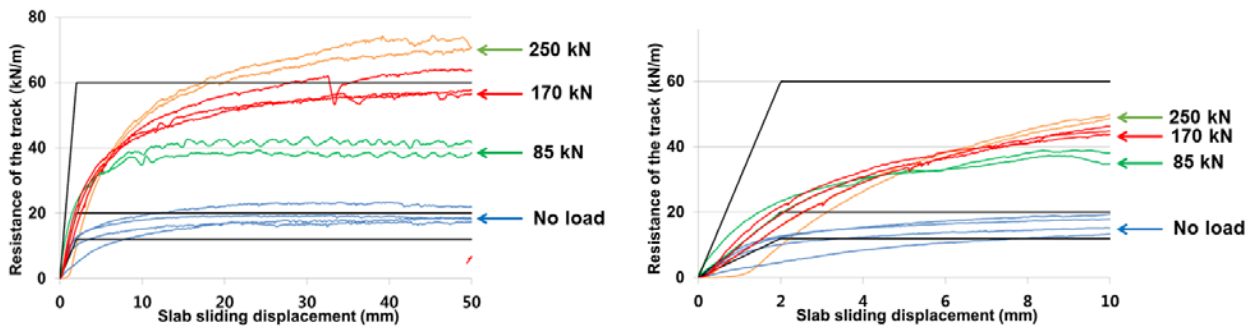


Fig. 4 Mock-up test results of longitudinal resistance of the track on the bridge deck

기존 실험[5][6] 결과에서 30mm까지의 종방향 변위에 대한 회귀분석을 한 결과는 Table 1과 같다. 식 (1)을 이용한 회귀분석의 결과는 R^2 가 모든 실험에서 90% 이상을 보이며, 안정적으로 수렴하여 최대값을 도출하는 것으로 보이지만, 30mm의 변위가 실제적인 현장을 반

영하는지에 대해서는 논란의 여지를 가지고 있다. 또한 한계변위를 도출하는 방법에 대해서도 기존에 체결구 실험에서 회복 변위를 한계변위로 가정하는 방법[7]은 한계점을 가지게 된다. 즉, 체결구 실험에서는 초기 변위와 회복 변위가 체결구에서 발생하였기 때문에 이를 동일하게 가정할 수 있지만, 자갈궤도에서 30mm 정도의 종방향 변위가 발생하였을 때는 초기 변위가 발생할 때와 최종 변위 시의 자갈의 상태가 매우 다르기 때문이다.

Table 1 Regression of Test results

Vertical load	F_{max} (kN)	R^2	Ave./SD
Not applied	21.85	0.969	18.88/2.60
	20.37	0.981	
	19.65	0.970	
	14.27	0.912	
	17.96	0.979	
	19.18	0.905	
Applied	52.39	0.983	55.53/3.06
	56.89	0.991	
	53.72	0.988	
	59.14	0.986	

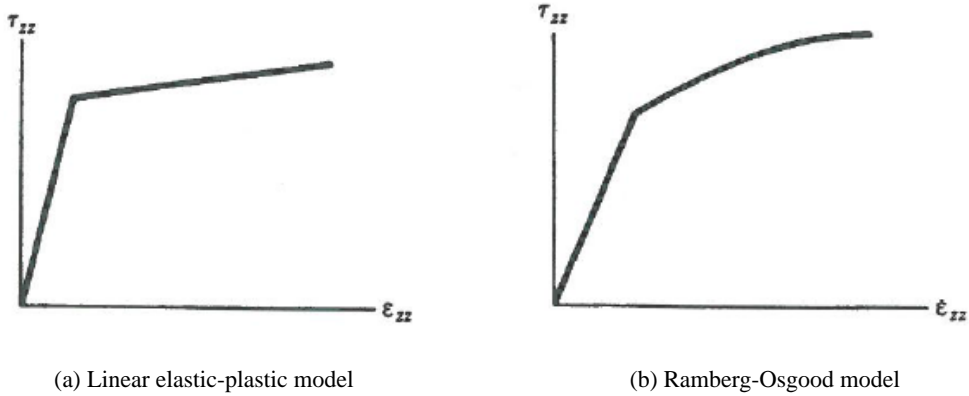


Fig. 5 Strain hardening models

$$\text{Bilinear model: } \sigma = \begin{cases} E\varepsilon \\ \sigma_y + F(\varepsilon - \varepsilon_y) = \sigma_y + E^p(\varepsilon - \varepsilon_y) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Ramberg-Osgood model: } \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha^* \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

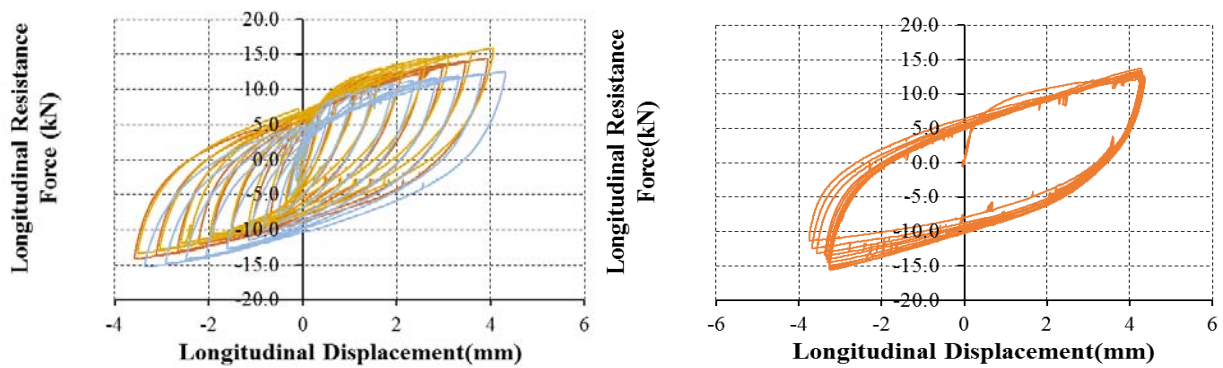


Fig. 6 Hysteresis loop of longitudinal resistance of ballast track

2.2 비선형 모델

실제 발생하는 변위의 범위를 고려한 자갈궤도의 종저항력은 전술한 바와 같이 탄성완전소성 모델을 이용하는 것은 다소 한계를 보인다. 특히 한계 변위를 2mm로 규정하고 있으며, 이 변위를 전후한 범위에서 종방향 저항력은 기존의 모델을 사용하는 것은 실제 현상을 왜곡할 수 있다. 따라서 탄소성(elastic-plastic) 모델이나 비선형성을 고려한 모델을 사용하는 것이 실제 현상을 비교적 정확하게 반영할 수 있다. 이를 위해 Fig. 6과 같이 한계변위 이후에도 어느 정도의 강성을 보이는 변형 경화 모델(bilinear model 또는 Ramberg-Osgood model)[8][9]을 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 또한 장기적으로 볼 때 장대레일에 발생하는 종방향 변위는 반복하중이 형태를 보이므로 hysteresis loop를 고려하여, 한계변위를 설정하는 방안이 제시되어야 한다. Fig. 7은 hysteresis loop를 보이는 실험 결과의 일부이다.

3. 결론

기존의 자갈궤도 종저항력에 대한 규정은 탄성완전소성 모델을 가정하여 사용하고 있다. 반면 실질적으로 발생하는 범위에 대해서 이를 적용하는 것은 실제 현상을 반영하는데 한계를 보이고 있다. 이에 따라 변형 경화 모델을 적용하는 것이 필요하며, bilinear kinetic model이나 Ramberg-Osgood model 등을 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 17RTRP-B067919-05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] KR (2012) Track-Bridge Longitudinal Interaction Analysis, KR C-08080, Korea Rail Network Authority.
- [2] UIC (2001) Track/bridge Interaction Recommendations for Calculations, UIC Code 774-3, International Union of Railways.
- [3] J. van't Zand and J. Moraal (1997) Ballast Resistance under Three-Dimensional Loading, ERRI D 202/DT 362, European Rail Research Institute.
- [4] C. Esveld (1997) Improved Knowledge of CWR Track, Delft University Press.
- [5] K.-H. Min, K.-M. Yun (2016) An experimental study for longitudinal resistance of ballast track on bridge, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.17, No.5, pp.173-178.
- [6] K.-H. Min, B.-H. Jeon, K.-M. Yun, and N.-H. Lim (2016) A performance of longitudinal resistance of ballast track on bridge deck, Proc. 1st Asian Conf. Railway Infrastructure Transportation (ART 2016), October, Jeju, South Korea.
- [7] KRS (2009) Rail Fastening System, KRS TR 0014-15R, Korean Railway Standards.
- [8] T. Akazawa, M. Nakashima, and O. Sakaguchi. (1996), Simple model for simulating hysteretic behavior involving significant strain hardening, Proc. 11th World Conf. Earthquake Eng. Paper No. 264.
- [9] T. Sireteanu, A.M. Mitu, M. Giuclea, O. Solomon, and D. Stefanov. (2014) Analytical method for fitting the Ramberg-Osgood model to given hysteresis loops, Proc. Romanian Academy, Series A, 15(1), pp.35-42.**