

자갈도상용 PSC침목 중앙부에 대한 부모멘트 산정식 제안

Proposition of Negative Moment Equation for PSC Sleeper Center in Ballast Track

배영훈[†]Young-Hoon Bae[†]

Abstract When a negative moment is calculated for the sectional design and determination of test load on center section of PSC sleeper in ballast track, finite element analysis or negative moment equation quoted in UIC 713R is in general use. Because the assumption of ballast reaction distribution for calculating the negative moment in UIC 713R is different depending on the bottom surface shape of concrete sleeper and is not practical, the negative moment for sleeper center section calculated by UIC 713R is far larger than it being calculated by other standards on concrete sleeper. For improvement on the negative moment equation for sleeper center section in UIC 713R, new negative equation was proposed for considering the practical ballast reaction and various shapes of bottom surface in PSC sleeper.

Keywords : Ballast track, PSC sleeper, Negative moment, Ballast reaction

초 록 자갈도상용 PSC침목 중앙부에 대한 단면 설계 및 시험 하중 결정을 위해 부모멘트를 산정할 경우, 일반적으로 수치해석을 수행하거나 UIC 713R 규격에 제시된 부모멘트 산정식이 이용되고 있다. 그러나 UIC 713R 규격에서 부모멘트 산정을 위한 도상반력 분포 가정이 침목 저부 형상별로 상이하며 그 가정이 현실적이지 못한 관계로 타 규격에 비해 침목 중앙부의 부모멘트가 과도하게 산정되고 있다. 본 논문에서는 UIC 713R 규격에 제시된 침목 중앙부 부모멘트 산정식을 개선하기 위해, 실제 현장에서 측정된 도상반력 분포 사례를 분석하여 실제적인 도상반력 분포에 대한 가정이 침목 중앙부 부모멘트 산정식에 반영되도록 하였으며, 침목 저부의 다양한 형상이 하나의 식으로 표현될 수 있도록 부모멘트 산정식을 제안하였다.

주요어 : 자갈도상, PSC침목, 부모멘트, 도상반력

1. 서 론

자갈도상용 PSC침목 중앙부 단면 설계 시 도상반력 분포를 어떻게 가정하는지에 따라 설계 모멘트 값에 큰 차이가 발생할 수 있다. 일반적으로 보수적인 설계 관점에서의 도상반력은 균등 분포로 가정되고 있다. 그러나 실제 현장에서 측정된 도상반력 분포는 도상의 재료 특성의 변동, 다짐도 변화, 열차 운행 조건 다양화 및 도상의 점진적 열화 등으로 인해 균등하지 않은 것으로 보고되고 있다.

따라서 자갈도상용 PSC침목 중앙부 단면의 경제적인 설계를 위해서는 기존의 균등한 도상반력 분포 가정에 대해 수정이 요구된다. 본 논문에서는 자갈도상용 PSC침목 중앙부의 부모멘트 산정을 위한 도상반력 분포 형상을 가정하고 그에 대한 부모멘트 산정식을 제안하고자 한다.

[†] 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부(yhbae@krrri.re.kr)

2. 자갈도상용 PSC침목 중앙부의 부모멘트 산정식 제안

2.1 자갈도상에서 도상반력 분포

자갈도상용 PSC침목 중앙부의 부모멘트를 산정하기 위해서는 적절한 도상반력을 가정할 필요가 있다. UIC 713R[1], AS 1085.14[2] 등의 규격에서는 Fig. 1과 같이 균등한 도상반력 분포가 적용되고 있으나, 실제 자갈도상의 경우 점진적인 열화 등의 이유로 인해 도상반력은 등분포가 아니다. J. Sadeghi 등은 도상반력에 대해 현장 실측 및 분석 연구를 수행했으며, 이에 대한 도상반력 분포 형태는 Fig. 2와 같다[3].

Fig. 1과 같이 균등한 도상반력을 이용하여 침목 중앙부 부모멘트를 계산할 경우 모멘트가 과도하게 산출될 수 있으므로, 경제적 설계를 위해서는 Fig. 2의 도상반력 분포를 적용하여야 한다. 다만, Fig. 2의 도상분포를 적용하여 모멘트를 산정하기는 쉽지 않으므로 Fig. 3과 같이 이상화된 도상반력 형상을 가정하는 것이 중요하다.



Fig. 1 Results of structural analysis for wide sleeper on asphalt track in high-speed railroad

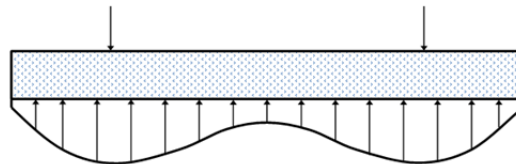


Fig. 2 Variable distribution of sleeper-ballast contact pressure according to field test

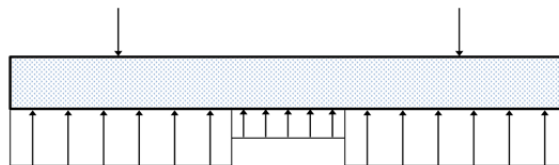


Fig. 3 Idealized distribution of sleeper-ballast contact pressure

2.2 PSC침목 중앙부 부모멘트 산정식 제안

2.2.1 부모멘트 산정식 유도

자갈도상용 PSC침목 중앙부 부모멘트 산정을 위한 도상반력은 Fig. 3의 이상화된 모델을 적용하되, 도상반력 감소 구간 길이를 f , 감소 비율을 α 로 설정하였고, 침목 저부의 다양한 형상을 반영하기 위한 기하학적 요소들도 첨가하였다.

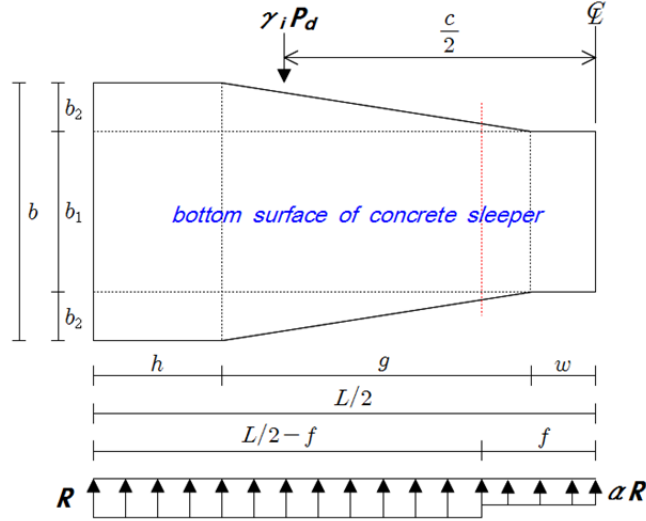


Fig. 4 Assumption of ballast reaction at the bottom surface of concrete sleeper

Fig. 4에서 레일 좌면부 작용 하중과 도상반력에 대한 평형방정식은 식(1)과 같으며, 이를 간략히 정리하면 식(2)와 같다.

$$\gamma_i P_d = R \left[b_1 \left(\frac{L}{2} - f \right) + b_2 \left\{ 2h + \left(\frac{g + (f - \omega)}{g} \right) (g - (f - \omega)) \right\} \right] + \alpha R \left[b_1 f + \frac{b_2 (f - \omega)^2}{g} \right] \quad (1)$$

$$\gamma_i P_d = R \left[b_1 \left(\frac{L}{2} - (1 - \alpha) f \right) + b_2 \left\{ 2h + g - (1 - \alpha) \frac{(f - \omega)^2}{g} \right\} \right] \quad (2)$$

Fig. 3에서 침목 중심에서의 부모멘트를 계산하면 식(3)과 같으며, 식(2)를 식(3)에 대입하면 식(4)와 같다.

$$M_{dc^-} = \gamma_i P_d \frac{c}{2} - R \left[\frac{b_1}{2} \left(\frac{L^2}{4} - f^2 \right) + \alpha \frac{b_1 f^2}{2} + b_2 h (L - h) + \left(b_2 + \frac{b_2 (f - \omega)}{g} \right) (g - (f - \omega)) \left\{ \frac{(g - (f - \omega)) \left(2b_2 + \frac{b_2 (f - \omega)}{g} \right)}{3 \left(b_2 + \frac{b_2 (f - \omega)}{g} \right)} + f \right\} + \alpha \frac{b_2 (f - \omega)^2 (2f + \omega)}{3g} \right] \quad (3)$$

$$M_{dc^-} = \gamma_i P_d \frac{c}{2} \left[\frac{\left\{ \frac{b_1}{2} \left(\frac{L^2}{4} - (1 - \alpha) f^2 \right) + b_2 \left\{ hL - h^2 + \frac{(g - (f - \omega))^2 (2g + (f - \omega))}{3g} + gf - (1 - \alpha) \frac{(f - \omega)^2}{g} f - \frac{\alpha}{3g} (f - \omega)^3 \right\} \right\}}{b_1 \left(\frac{L}{2} - (1 - \alpha) f \right) + b_2 \left\{ 2h + g - (1 - \alpha) \frac{(f - \omega)^2}{g} \right\}} \right] \quad (4)$$

여기서, $\frac{(g - (f - \omega))^2 (2f + (f - \omega))}{3g} = \frac{2g^2}{3} - g(f - \omega) + \frac{(f - \omega)^3}{3g}$ 이므로 이를 식(4)에 대입하면 식(5)와 같다.

$$M_{dc^-} = \gamma_i P_d \left[\frac{c}{2} - \frac{\left\{ \frac{b_1}{2} \left(\frac{L^2}{4} - (1-\alpha)f^2 \right) + b_2 \left\{ hL - h^2 + f \left(g - (1-\alpha) \frac{(f-\omega)^2}{g} \right) + \frac{2g^2}{3} - g(f-\omega) - \frac{(1-\alpha)(f-\omega)^3}{3g} \right\} \right\}}{b_1 \left(\frac{L}{2} - (1-\alpha)f \right) + b_2 \left\{ 2h + g - (1-\alpha) \frac{(f-\omega)^2}{g} \right\}} \right] \quad (5)$$

$g\omega = g \left(\frac{L}{2} - g - h \right)$ 이므로, 이를 식(5)에 대입하여 정리하면 식(6)과 같다.

$$M_{dc^-} = \gamma_i P_d \left[\frac{c}{2} - \frac{\left\{ \frac{b_1}{2} \left(\frac{L^2}{4} - (1-\alpha)f^2 \right) + b_2 \left\{ hL + \frac{gL}{2} - \left(h^2 + gh + \frac{g^2}{3} \right) - (1-\alpha) \frac{(f-\omega)^2}{g} \left(f - \frac{f-\omega}{3} \right) \right\} \right\}}{b_1 \left(\frac{L}{2} - (1-\alpha)f \right) + b_2 \left\{ 2h + g - (1-\alpha) \frac{(f-\omega)^2}{g} \right\}} \right] \quad (6)$$

최종적으로 식(6)을 간략화하면 자갈도상용 PSC침목 저부의 다양한 형상 및 앞서 가정한 도상반력이 반영된 침목 중앙부 부모멘트 산정을 위한 일반식은 식(7)과 같이 도출될 수 있다.

$$M_{dc^-} = \gamma_i P_d \left[\frac{c}{2} - \frac{L}{2} + \frac{\left\{ b_1 \left\{ \frac{L^2}{8} - \frac{(1-\alpha)f(L-f)}{2} \right\} + b_2 \left\{ \left(h^2 + gh + \frac{g^2}{3} \right) - (1-\alpha) \frac{(f-\omega)^2}{g} \left(\frac{L}{2} + \frac{2f-\omega}{3} \right) \right\} \right\}}{b_1 \left(\frac{L}{2} - (1-\alpha)f \right) + b_2 \left\{ 2h + g - (1-\alpha) \frac{(f-\omega)^2}{g} \right\}} \right] \quad (7)$$

2.2.2 제안된 부모멘트 산정식과 UIC 713R 부모멘트 산정식의 비교

UIC 713R은 Fig. 3에서 $\alpha = 0.5$ 인 도상반력 분포를 가정할 경우 침목 저부 형상이 직사각형 단면에 대한 부모멘트 산정을 권장하고 있으며, $\alpha = 1.0$ 인 도상반력 분포를 가정할 경우 침목 저부 형상이 변단면에 대한 부모멘트 산정을 권장하고 있다.

먼저 $\alpha = 0.5$ 일 때 $b_2 = 0$ 이므로, 이를 식(7)에 대입하면 식(8)과 같으며, 이는 UIC 713R 식(4.1)과 동일함을 알 수 있다(UIC 713R의 f 는 본 논문에서 가정된 f 의 2배임을 고려하여야 함).

$$M_{dc^-} = \gamma_i P_d \left\{ \frac{c}{2} - \frac{L^2 - 2f^2}{4(L-f)} \right\} \quad (8)$$

또한 변단면 침목 저부 형상에 대해 $\alpha = 1.0$ 을 식(7)에 대입하면 그 결과는 식(9)와 같으며, 이는 UIC 713R 식(4.2)와 정확하게 일치한다.

$$M_{dc^-} = \gamma_i P_d \left[\frac{c}{2} - \frac{L}{2} + \frac{b_1 \frac{L^2}{8} + b_2 \left(h^2 + gh + \frac{g^2}{3} \right)}{b_1 \frac{L}{2} + b_2 (2h + g)} \right] \quad (9)$$

따라서 본 논문에서 제안된 자갈도상용 PSC침목 중앙부의 부모멘트 산정식은 UIC713R에서 가정하고 있는 다양한 도상반력 분포 및 침목 저부 형상 조건을 모두 반영할 수 있으며, 도상

반력 분포와 관련된 α 와 f 를 철도 현장 조건에 맞게 연구자 또는 실무자가 수치를 입력할 수 있는 유연성도 가지고 있다.

2.2.3 국내 적용 중인 PSC침목에 대한 부모멘트 산정식 적용

국내 적용 중인 PSC침목은 2.4m 길이의 일반철도용과 2.6m 길이의 고속철도용으로 구분되며, 주요 제원은 Table 1과 같다. 도상반력이 감소되는 구간 길이는 J. Sadeghi의 가정인 $(2c-L)/2$ 를 적용하였으며[4], 침목 중앙부의 도상반력 감소율 α 는 0.6을 가정하였다.

레일 좌면부 작용 하중은 UIC 713R의 절차를 적용하였으며, 고속선 및 일반선용 PSC침목 중앙부 부모멘트 계산 결과는 Table 2와 같다.

Table 1 Main dimension of HSL and CL PSC sleepers

Dimension items	High speed line	Conventional line	Remarks
C(Rail seat center spacing), m	1.507	1.507	
L(Sleeper length), m	2.600	2.600	
b_1 (Width of waisted section of sleeper), m	0.250	0.220	
b_2 (Additional width at each side of rail seat section of sleeper), m	0.025	0.030	
h(Length of wide section at sleeper end), m	0.300	0.246	
g(Length of tapering section), m	0.500	0.804	
ω (Half the length of center zone), m	0.500	0.150	
f(Half the length of reduced reaction zone, assumption), m	0.200	0.300	$(2c-L)/2$

Table 2 Calculation results of negative moment for PSC sleeper center in ballast track

Dimension items	High speed line	Conventional line	Remarks
Static Axle load, kN	225	225	
Corresponding speed, km/h	200	300	
Rail seat center spacing, m	0.6	0.6	
Speed increment factor, γ_v	0.75	0.75	
Pad factor, γ_p	0.78	1.00	
Distribution factor, γ_d	0.5	0.5	
Support fault factor, γ_r	1.35	1.35	
Rail seat load, kN	120.36	132.89	
Irregularity factor, γ_i	1.6	1.6	
M_{dc} , kN·m(Proposed Eq.)	7.18	16.28	
M_{dc} , kN·m(Eq. 4.2 in UIC 713R)	14.58	26.24	
M_{dc} , kN·m(Empirical Eq. in UIC 713R)	16.25	12.04	

3. 결 론

본 논문에서는 자갈도상용 PSC침목 중앙부 단면의 경제적인 설계를 위해 도상반력 감소율과 침목의 다양한 형상을 고려할 수 있는 부모멘트 산정식을 제안하였다. 일반철도용 PSC침목의 경우 제안식으로 산정된 부모멘트는 UIC713R의 일반식 대비 약 38% 감소되었으며, 경험식과 비교적 유사한 값이 도출되었다. 고속철도용 PSC침목의 경우 제안식으로 산정된 부모멘트는 UIC713R의 일반식 대비 약 50% 감소되었음을 알 수 있다.

제안된 자갈도상용 PSC침목 중앙부 부모멘트 산정식은 실무적인 측면에서 다소 복잡할 수 있으므로, 향후 도상반력 분포 관련 여러 가지 이론 및 현장 실험 데이터 등의 추가적인 분석을 통해 합리적이면서 좀더 쉽게 적용될 수 있게 하기 위한 부모멘트 산정식의 단순화 과정이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 “자갈레도 궤도구조 개량기술 시스템 설계 및 성능평가”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] UIC (2004) UIC 713R *Design of monoblock concrete sleepers*, Paris, France, 26 pp
- [2] Standard Australia International (2003) AS 1085 *Railway track material Part 14: Prestressed concrete sleepers*, Sydney, Australia, 60 pp
- [3] J.A. Zakeri, J. Sadeghi (2007) Field investigation on load distribution and deflections of railway track sleepers, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp.1948-1956
- [4] J. Sadeghi (2012) New advances in design of railway track system, *Reliability and Safety in Railway*, march, 2012, pp.75-100