

# 프리스트레스트 콘크리트 침목의 설계승인 시험 기준 적정성 연구

## A study on Adequacy of Design Acceptance Criteria for Prestressed Concrete Sleepers

배영훈<sup>†</sup>, 장승엽<sup>\*</sup>, 황성호<sup>\*</sup>

Young-Hoon Bae<sup>†</sup>, Seung-Yup Jang<sup>\*</sup>, Sung-Ho Hwang<sup>\*</sup>

**Abstract** The acceptance criteria specified in EN 13230-2 or KRS TR 0008 have been used in design approval test for prestressed concrete sleepers. The coefficients of  $k_{1s}$ ,  $k_{2s}$ ,  $k_{1d}$ ,  $k_{2d}$  that are applied to static and dynamic test standards for rail seat section and the first crack initiation criteria are equal to values or contents recommended by CEN. In this study, adequacy of the coefficients of  $k_{1s}$ ,  $k_{2s}$ ,  $k_{1d}$ ,  $k_{2d}$  were evaluated as the analysis of the design approval test data for prestressed concrete sleepers used in domestic. Adequacy of the first crack initiation criteria for static bending test was also evaluated as calculation of moment causing first crack for rail seat section.

**Keywords** : Prestressed concrete sleeper, Design approval test, Acceptance criteria

**초 록** 프리스트레스트 콘크리트 침목에 대한 설계승인 시험 시 EN 13230-2 또는 이를 부합화한 KRS TR 0008 규격 내 승인 기준이 적용되고 있다. 이 승인 기준에서 레일 좌면부 정적 및 동적 휨 강도 시험 기준에 적용되고 있는 계수  $k_{1s}$ ,  $k_{2s}$ ,  $k_{1d}$ ,  $k_{2d}$  및 정적 시험 시 초기 균열 기준은 유럽 표준에서 권장되고 있는 값 또는 표현이 사용되고 있다. 본 연구에서는 국내에 적용되고 있는 프리스트레스트 콘크리트 침목에 대해 기 수행된 설계승인 시험 결과를 분석하여 설계승인 기준에 사용되는 계수  $k_{1s}$ ,  $k_{2s}$ ,  $k_{1d}$ ,  $k_{2d}$ 의 적정성을 평가하였다. 또한 레일 좌면부의 초기 균열을 야기하는 모멘트 계산을 통해 정적 휨 시험 시 초기 균열 기준의 적정성을 평가하였다.

**주요어** : 프리스트레스트 콘크리트 침목, 설계승인 시험, 승인 기준

## 1. 서 론

자갈도상용 PSC침목 설계가 완료되면 설계 적합성을 평가하기 위한 시험이 실시된다. 이때 열차하중이 반복적으로 가해지는 레일 좌면부에 대한 시험적 검토가 필수적으로 이루어져야 한다. PSC침목 설계승인을 위한 정·동적 휨 강도 시험 시, 유럽 표준 또는 이를 부합화한 한국 철도표준규격 내 설계승인 시험 기준이 적용되는데, 시험 기준의 주요 확인 사항은 균열폭이며, 최초 균열 발생 시, 하중 제거 후 균열폭 0.05 mm 및 0.5 mm 이상일 때의 하중 또는 모멘트 값이 설정된 기준을 상회하는지 여부가 검토된다. 본 연구에서는 침목의 정·동적 휨 강도에 대한 설계승인 기준에 사용되는  $k_{1s}$ ,  $k_{2s}$ ,  $k_{1d}$ ,  $k_{2d}$  및 초기 균열 기준에 대한 적정성을 평가하고자 한다.

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

\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

## 2. PSC침목의 정·동적 휨 강도에 대한 설계승인 시험기준의 적정성

### 2.1 정적 휨 강도 시험 시 최초 균열 발생 기준의 적정성 검토

EN 13230-2[1] 및 KRS TR 0008[2]에서 레일 좌면부 정적 휨 강도 시험 시, 침목에 최초 균열이 발생될 때의 기준은  $F_{r1} > F_{r0}$  (또는  $M_{r1} > M_{dr+}$ )이다. 그러나 PSC침목 생산 후 휨강도 시험 시기에 따라 침목의 최초 균열을 발생시키는 하중은 차이가 있을 수 있다. 또한 프리스트레스의 시간 의존적 손실 및 열차하중 작용 여부에 따라서도 최초 균열 하중은 달라질 수 있다. prEN 13230-6[3]에서는 식(1)과 같이 레일 좌면부에 작용하는 공칭모멘트( $M_{dr+}$ )에 침목 재령에 따른 휨 응력 및 프리스트레스 손실에 따른 콘크리트 응력을 고려한 시험 휨 모멘트가 제안되고 있다.

$$M_{1,r^+} = M_{dr^+} + \alpha = M_{dr^+} + \left\{ (f_{ct,fl,t=28days} - f_{ct,fl,fat}) + (\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40years} - \Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28days}) \right\} \cdot Z_b = k_t \cdot M_{dr^+} \quad (1)$$

국내에 적용되고 있는 고속 및 일반철도용 PSC침목에 대해 식(1)을 적용하여  $M_{1,r^+}$ 을 계산하면 Table 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이때, 프리스트레스의 시간적 손실에 따른 콘크리트의 응력 계산을 위해서 EN 1992-1-1[4]에서 제안되고 있는 식(2)를 이용하였다.

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \frac{\varepsilon_{cs} E_p + 0.8 \Delta f_{pr} + \frac{E_p}{E_c} \Phi(t, t_0) \cdot f_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_c} \frac{A_p}{A_c} \left( 1 + \frac{A_c}{I_c} e^2 \right) \cdot [1 + 0.8 \Phi(t, t_0)]} \quad (2)$$

**Table 1** Calculation results of test moment for rail seat section of PSC sleeper in ballast track

Items	High speed line	Conventional line	Remarks
$M_{dr+}$ , kN·m	15.08	16.29	
$f_{ct,fl,t=28days}$ , MPa ( $=0.63 \sqrt{f_{ck}}$ )	4.45	4.45	$f_{ck} = 50$ MPa
$f_{ct,fl,fat}$ , MPa	3.0	3.0	prEN 13230-6
$\varepsilon_{cs}$ (Shrinkage strain)	0.00041	0.00041	EN 1992-1-1, Annex B
$\Phi(t, t_0)$ (Creep coefficient)	3.09	3.09	EN 1992-1-1, 3.1.4 & Annex B
$\Delta f_{pr}$ , MPa (Relaxation losses)	56.79	56.79	EN 1992-1-1, Annex D
$E_p$ , MPa	200,000	200,000	
$E_c$ , MPa ( $=0.077 m_c^{1.5} f_{cu}^{1/3}$ )	36,603	36,603	$m_c = 2,500$ kg/m <sup>3</sup> , $f_{cu} = 55$ MPa
$A_p$ , mm <sup>2</sup>	317	317	SWPD3(19.82 mm <sup>2</sup> ), 16EA
$A_c$ , mm <sup>2</sup>	48,402	46,228	The area of rail seat section
$I_c$ , mm <sup>4</sup>	1.651E+08	1.417E+08	The second moment of area of rail seat section
$e$ , mm	5.7	6.7	eccentricity
$f_{c,QP}$ , MPa	9.16	9.59	EN 1992-1-1 5.10.6
$\Delta P_{c+s+r,t=40years}$ , kN	79.70	81.27	EN 1992-1-1 5.10.6

$\Delta P_{c+s+r,t=28days}$ , kN	33.41	34.23	EN 1992-1-1 5.10.6
$\Delta \sigma_{c,c+s+r,t=40years}$ , MPa	1.65	1.76	$\Delta P_{c+s+r,t=40years} / A_c$
$\Delta \sigma_{c,c+s+r,t=28days}$ , MPa	0.69	0.74	$\Delta P_{c+s+r,t=28days} / A_c$
$Z_b$ , mm <sup>3</sup>	1.717E+06	1.536E+06	The modulus of rail seat section
$M_{t,r+}$ , kN·m	19.22	20.08	
$k_t$	1.27	1.23	$M_{t,r+} / M_{dr+}$

Table 1에서  $k_t$  값은 고속철도용 침목의 경우 1.27, 일반철도용 침목의 경우 1.23이다. 고속 및 일반철도용 PSC침목에 대한 최초 균열 발생 시의 기준으로 적용하기 위해 단순화를 시키면  $k_t = 1.2$ 를 적용할 수 있으며, 따라서 침목 휨 강도 시험 시 최초 균열 발생 시 기준은  $F_{r_t} > 1.2F_{r_0}$  (또는  $M_{r_t} > 1.2M_{dr+}$ )로 표현할 수 있다. 고속철도용 침목 및 일반철도용 침목 각각 3개에 대한 시험결과( $M_{r_t}$ )[5]와  $M_{t,r+}$ ,  $1.2M_{dr+}$ 을 비교하면 Table 2와 같다. 두 종류의 침목 모두 최초 균열을 발생시키는 모멘트 평균값이  $1.2M_{dr+}$ 을 상회함을 알 수 있다.

**Table 2** Comparison between the test results for bending moment( $M_{r_t}$ ) and  $1.2M_{dr+}$  at crack initiation

PSC sleeper	Test No.	$M_{dr+}$ (kN·m)	$M_{t,r+}$ (kN·m)	$M_{r_t}$ (kN·m)	Remarks
High speed line	1	15.08	19.22	27.50	
	2			27.50	
	3			26.25	
	AVG			27.08	> $1.2M_{dr+} = 18.1$
Conventional line	1	16.29	20.08	21.50	
	2			19.50	
	3			20.50	
	AVG			20.50	> $1.2M_{dr+} = 19.5$

## 2.2 정적 휨 강도 시험 시 $k_{1s}$ 및 $k_{2s}$ 의 적정성 검토

EN 13230-2 및 KRS TR 0008에서 레일 좌면부 정적 휨 강도 시험 시, 침목에 최초 균열이 발생하는 하중뿐만 아니라 균열폭이 0.05 mm 및 0.5 mm 이상(더 이상 하중 증가가 없는 시점)일 때 하중 또는 모멘트 기준이 존재한다. 현 기준은  $F_{r_{0.05}} > k_{1s} \cdot F_{r_0}$  (또는  $M_{r_{0.05}} > k_{1s} \cdot M_{dr+}$ ) 및  $F_{r_{0.5}} > k_{2s} \cdot F_{r_0}$  (또는  $M_{r_{0.5}} > k_{2s} \cdot M_{dr+}$ ) 이며, 이때 추천되는  $k_{1s}$  및  $k_{2s}$ 는 1.8 및 2.5이다.

그러나  $k_{1s}$  및  $k_{2s}$ 를 Table 3에서  $M_{r_{0.05}}/M_{dr+}$  및  $M_{r_{0.5}}/M_{dr+}$ 와 비교할 경우 상당한 차이가 발생함을 알 수 있다. 반면에 앞서 검토된  $1.2M_{dr+}$ 을 적용할 경우 Table 3에서 알 수 있듯이, 일반철도용 PSC침목은 유럽표준 또는 한국철도표준에서 추천되는 값과 유사한 값을 나타낸다. 고속철도용 PSC침목 또한  $1.2M_{dr+}$ 을 적용할 때가  $k_{1s}$  및  $k_{2s}$  추천값에 가까워지며 품질기준을 강화하는 방향으로 나아감을 알 수 있다. 따라서 PSC침목 레일 좌면부 정적 휨 강도 시험 시, 균열폭이 0.05

mm 및 0.5 mm 이상(더 이상 하중 증가가 없는 시점)일 때의 설계승인 시험기준은  $k_{1s}$  및  $k_{2s}$  추천값을 적용하되  $Fr_{0.05} > k_{1s} \cdot 1.2Fr_0$  (또는  $Mr_{0.05} > k_{1s} \cdot 1.2M_{dr+}$ ) 및  $Fr_{0.5} > k_{2s} \cdot 1.2Fr_0$  (또는  $Mr_{0.5} > k_{2s} \cdot 1.2M_{dr+}$ )로 수정되는 것이 타당하다고 판단된다.

**Table 3** Comparison between the test results for bending moment( $M_{r,0.05}$ ,  $M_{r,0.5}$ ) and  $1.2M_{dr+}$  at crack width 0.05mm and 0.5mm above in static bending tests

PSC sleeper	Test No.	$M_{r,0.05}$ (kN·m)	$M_{r,0.5}$ (kN·m)	$M_{r,0.05}/M_{dr+}$	$M_{r,0.5}/M_{dr+}$	$M_{r,0.05}/1.2M_{dr+}$	$M_{r,0.5}/1.2M_{dr+}$
High speed line	1	45.00	66.25	-	-	-	-
	2	43.75	67.75				
	3	45.00	64.00				
	AVG	44.58	66.00				
Conventional line	1	38.50	50.50	-	-	-	-
	2	41.50	50.50				
	3	40.50	49.50				
	AVG	40.17	50.17				

### 2.3 동적 휨 강도 시험 시 $k_{1d}$ 및 $k_{2d}$ 의 적정성 검토

EN 13230-2 및 KRS TR 0008에서 레일 좌면부 동적 휨 강도 시험 시, 균열폭이 0.05 mm 및 0.5 mm 이상(더 이상 하중 증가가 없는 시점)일 때 하중 또는 모멘트 기준이 존재한다. 현 기준은  $Fr_{0.05} > k_{1d} \cdot Fr_0$  (또는  $Mr_{0.05} > k_{1d} \cdot M_{dr+}$ ) 및  $Fr_{0.5} > k_{2d} \cdot Fr_0$  (또는  $Mr_{0.5} > k_{2d} \cdot M_{dr+}$ ) 이며, 이때 추천되는  $k_{1d}$  및  $k_{2d}$ 는 1.5 및 2.2이다.

그러나  $k_{1s}$  및  $k_{2s}$ 를 Table 4에서  $Mr_{0.05}/M_{dr+}$  및  $Mr_{0.5}/M_{dr+}$ 와 비교할 경우 고속 및 일반철도용 침목 모두 다소 차이가 발생함을 알 수 있다. 반면에 앞서 검토된  $1.2M_{dr+}$ 을 적용할 경우 Table 4에서 알 수 있듯이, 일반철도용 PSC침목은 유럽표준 또는 한국철도표준에서 추천되는 값과 유사한 값을 나타낸다. 고속철도용 PSC침목 또한  $1.2M_{dr+}$ 을 적용할 때가  $k_{1s}$  및  $k_{2s}$  추천값에 가까워지며 품질기준을 강화하는 방향으로 나아감을 알 수 있다. 따라서 PSC침목 레일 좌면부 동적 휨 강도 시험 시, 균열폭이 0.05 mm 및 0.5 mm 이상(더 이상 하중 증가가 없는 시점)일 때의 설계승인 시험기준은  $k_{1d}$  및  $k_{2d}$  추천값을 적용하되  $Fr_{0.05} > k_{1d} \cdot 1.2Fr_0$  (또는  $Mr_{0.05} > k_{1d} \cdot 1.2M_{dr+}$ ) 및  $Fr_{0.5} > k_{2d} \cdot 1.2Fr_0$  (또는  $Mr_{0.5} > k_{2d} \cdot 1.2M_{dr+}$ )로 수정되는 것이 타당하다고 판단된다.

**Table 4** Comparison between the test results for bending moment( $M_{r,0.05}$ ,  $M_{r,0.5}$ ) and  $1.2M_{dr+}$  at crack width 0.05mm and 0.5mm above in dynamic bending tests

PSC sleeper	Test No.	$M_{r,0.05}$ (kN·m)	$M_{r,0.5}$ (kN·m)	$M_{r,0.05}/M_{dr+}$	$M_{r,0.5}/M_{dr+}$	$M_{r,0.05}/1.2M_{dr+}$	$M_{r,0.5}/1.2M_{dr+}$
High speed line	1	30.00	43.75	-	-	-	-
	2	36.25	51.25				
	3	36.25	51.25				
	AVG	34.17	48.75				

Conventional line	1	32.50	42.50	-	-	-	-
	2	36.50	47.50				
	3	36.50	49.50				
	AVG	35.17	46.50	2.15	2.85	1.79	2.38

### 3. 결론

본 논문에서 자갈도상용 PSC침목의 설계승인 시험 시 EN 13230 및 KRS TR 0008에 규정된 최초 균열 발생 시, 균열폭 0.05 mm 및 균열폭 0.5 mm 이상인 지점에서의 설계승인 시험 기준을 검토한 결과, 침목의 재령에 따른 프리스트레스 시간적 손실 및 작용하중에 따른 콘크리트 휨 강도를 고려하여야 한다. PSC침목 정적 및 동적 휨 강도에 대한 설계승인 시험 기준(안)은 Table 5와 같다.

**Table 5** Design acceptance criteria for PSC sleepers used in ballast track

Static bending test	Dynamic bending test
♣ Formation of first crack : $M_{r_t} > k_t M_{dr+}$ ( $k_t = 1.2$ )	-
♣ Remaining crack width 0.05mm : $M_{r_{0.05}} > k_{1s} k_t M_{dr+}$ ( $k_t = 1.2, k_{1s} = 1.8$ )	♣ Remaining crack width 0.05mm : $M_{r_{0.05}} > k_{1d} k_t M_{dr+}$ ( $k_t = 1.2, k_{1s} = 1.5$ )
♣ Remaining crack width 0.5mm : $M_{r_{0.5}} > k_{2s} k_t M_{dr+}$ ( $k_t = 1.2, k_{1s} = 2.5$ )	♣ Remaining crack width 0.5mm : $M_{r_{0.5}} > k_{2d} k_t M_{dr+}$ ( $k_t = 1.2, k_{1s} = 2.2$ )

### 후 기

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

### 참고문헌

- [1] CEN (2009) EN 13230-2 *Railway applications-Track-Concrete sleepers and bearers-Part 2: Prestressed monoblock sleepers*, Brussels, Belgium, 28 pp
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015) KRS TR 0008 *Prestressed concrete sleeper*, Sejong, Korea, 23 pp
- [3] CEN (2014) prEN 13230-6 *Railway applications-Track-Concrete sleepers and bearers-Part 6: Design*, Belgium, 48 pp
- [4] CEN (2004) EN 1992-1-1 *Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings*, Brussels, Belgium, 225 pp
- [5] Y.H. Bae (2014) An evaluation of design compatibility for PSC sleepers in domestic railway, 2014 *Spring Conference of the Korean Society for Railway*, pp. 1599-1604.