

아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목 개발

배영훈¹, 이성혁^{2*}, 김응록³

Development of Wide Prestressed Concrete Sleeper for Asphalt Concrete Track

Young-Hoon Bae¹, Seong-Hyeok Lee^{2*}, Eung-Rok Kim³

Abstract: In order to minimize the deformation of asphalt concrete track(ACT) and ensure the structural safety, a wide type concrete sleeper is necessary to distribute vehicle loading and reduce the exposure of the asphalt roadbed. In this research, the wide prestressed concrete(PSC) sleeper for ACT was developed through the shape design and the structural safety was reviewed using finite element analysis. Furthermore, static test, dynamic test and fatigue test were carried out according to EN13230-2 to verify the design appropriateness of the wide PSC sleepers for ACT. The performance test showed that the developed wide PSC sleeper for ACT meets all the performance requirements by European standard.

Keywords: Asphalt concrete track, Wide PSC sleeper, Sleeper design, Design approval test, Design appropriateness

1. 서론

궤도 궤도 구조는 자갈궤도가 가장 보편적으로 사용되고 있고, 경부고속철도 2단계 건설 이후부터 고속선을 중심으로 콘크리트 궤도가 사용되어 오고 있다. 자갈궤도는 구조가 단순하며, 건설비가 저렴한 반면 궤도틀림, 자갈도상 마모 등에 따른 고가의 유지보수 비용이 필요하다. 콘크리트 궤도는 구조가 안전하며 유지보수 비용이 저렴한 반면 건설비가 자갈 궤도에 비해 매우 고가인 궤도 구조다.

한편 독일 및 오스트리아 등을 중심으로 적용되고 있는 아스팔트 콘크리트 궤도는 유지보수가 용이하고, 시공 및 유지보수 후 단시간 내에 열차 운행이 가능하며, 초기 건설비가 콘크리트 궤도에 비해 상대적으로 저렴한 궤도구조이다(Lee et al., 2016).

아스팔트 도상은 콘크리트 도상에 비해 온도 변화에 따른 아스팔트 재료의 소성변형이 크게 발생될 수 있으며, 낮은 탄성계수 값으로 인해 열차하중 작용 시 큰 변형이 발생될 수 있다. 따라서 아스팔트 도상위에 설치되는 침목을 통해 열차 하중을 분산 및 저감시키는 것이 중요하며, 이를 위해서는 아스

팔트 콘크리트 도상의 노출 면적 및 소성변형을 줄일 수 있는 광폭 형태의 콘크리트 침목이 개발될 필요가 있다(KRRI, 2016). 또한 아스팔트 콘크리트 궤도는 콘크리트 침목이 아스팔트 콘크리트 도상에 직결되는 궤도 구조이므로, 궤도 종·횡방향 저항력이 확보되어야 하며 궤도틀림 저감에 기여할 수 있는 크기로 설계되는 것이 중요하다.

본 논문에서는 아스팔트 콘크리트 궤도에 적용 가능한 침목의 저부 형상을 최적화하고, 침목에 가해지는 외력을 충분히 견딜 수 있는 단면이 적용된 광폭 PSC침목을 설계한 후, 콘크리트 침목에 대한 성능 시험 표준인 EN 13230-2에 따라 정적 휨 강도 시험, 동적 휨 강도 시험 및 피로 시험을 실시하여 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목의 설계가 적합한지 여부를 확인하고자 한다.

2. 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목 설계

2.1 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목 형상 설계

아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목 형상 결정 시, 선행되어야 할 부분이 침목 저부 형상 및 면적을 결정하는 것이다. 침목 저부 면적이 증가하면 아스팔트 도상에 작용되는 압력 및 아스팔트 도상의 외기 노출을 줄여 아스팔트의 변형을 감소시킬 수 있다. 또한, 침목 저부 형상에 따라 침목에 작용되는 모멘트가 달라지므로, 침목 저부 면적 및 형상은 광폭

¹정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

²정회원, 한국철도기술연구원 수석연구원, 교신저자

³정회원, 송원대학교 교수

*Corresponding author: shlee@krii.re.kr

Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, 16105, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

PSC침목 설계에서 매우 중요한 인자라 할 수 있다.

아스팔트 콘크리트는 표층, 중간층 및 기층별 재질이 다르며, 각 재질들은 온도에 따라 물성이 달라지는 특징을 가지고 있다. 아스팔트 콘크리트 층별 재료에 대해 -5°C, 10°C, 25°C 및 40°C에서 KS F 2351에 의거 압축강도를 측정했을 때 최소 값이 1.6 MPa로 보고되었다(KRRI, 2014). 또한 25°C에서의 아스팔트 콘크리트 인장강도 기준은 표층의 경우 0.8 MPa, 중간층 및 기층의 경우 0.7 MPa로 보고되었다(KRRI, 2016).

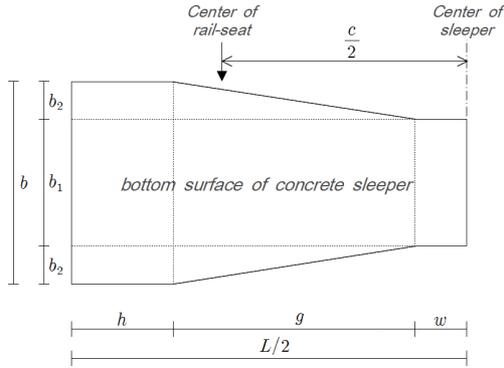


Fig. 1 General geometry of waisted railway sleeper

철도 궤도에 적용되는 콘크리트 침목의 일반적인 저부 형상은 Fig. 1과 같으며, 이러한 경우 침목 중앙부에 작용되는 부모멘트(M_{dc^-} , Negative moment, 상방향으로 침목의 휨을 야기시키는 모멘트)는 식 (1)과 같이 계산될 수 있다(UIC, 2004).

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

여기서, 부모멘트 산정을 위한 도상반력 분포는 등분포 형상으로 가정되었으며, c 는 레일 좌면부 중심간 거리(m), P_d 는 레일 좌면부에 작용되는 동적 하중(kN), L 은 침목 저부 길이(m), b 는 침목 저부 전체 폭(m), b_1 은 침목 중앙부 저부 폭(m), b_2 는 확장부 폭(m), h 는 광폭부 길이(m), g 는 저부 변단면 길이(m), w 는 침목 중앙부 길이(m), γ_i 는 아스팔트 도상과 침목 저부간의 접촉 불균일에 따른 휨 모멘트 증분을 고려하기 위한 계수이다. γ_i 는 도상의 종류 및 접촉 상태에 따라 값이 달라질 수 있으며, 아스팔트 콘크리트 궤도에 적합한 γ_i 관련 연구 결과가 없어서 UIC 713R에 정의된 1.6을 준용하였다.

아스팔트 콘크리트의 압축 및 인장강도 범위를 초과하지

Table 1 Results of case study on bottom surface's shape and area of wide PSC sleeper for ACT

| Case No. | C (m) | L (m) | b_1 (m) | b_2 (m) | h (m) | g (m) | w (m) | γ_i | P_d (kN) | A_c (m ²) | M_{dc^-} (kN-m) | P_d/A_c (MPa) |
|----------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-------|------------|------------|-------------------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 1.5 | 2.4 | 0.200 | 0.100 | 0.850 | 0.100 | 0.250 | 1.6 | 138.94 | 0.840 | 19.10 | 0.331 |
| 2 | 1.5 | 2.4 | 0.225 | 0.100 | 0.850 | 0.100 | 0.250 | 1.6 | 138.94 | 0.900 | 20.05 | 0.309 |
| 3 | 1.5 | 2.4 | 0.250 | 0.100 | 0.850 | 0.100 | 0.250 | 1.6 | 138.94 | 0.960 | 20.88 | 0.289 |
| 4 | 1.5 | 2.4 | 0.275 | 0.100 | 0.850 | 0.100 | 0.250 | 1.6 | 138.94 | 1.020 | 21.61 | 0.272 |
| 5 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 0.850 | 0.100 | 0.250 | 1.6 | 138.94 | 1.080 | 22.26 | 0.257 |
| 6 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 0.800 | 0.100 | 0.300 | 1.6 | 138.94 | 1.060 | 20.90 | 0.262 |
| 7 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 0.750 | 0.100 | 0.350 | 1.6 | 138.94 | 1.040 | 19.70 | 0.267 |
| 8 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 0.700 | 0.100 | 0.400 | 1.6 | 138.94 | 1.020 | 18.67 | 0.272 |
| 9 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 0.900 | 0.050 | 0.250 | 1.6 | 138.94 | 1.090 | 22.99 | 0.255 |
| 10 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 0.950 | 0.050 | 0.200 | 1.6 | 138.94 | 1.110 | 24.57 | 0.250 |
| 11 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 1.000 | 0.050 | 0.150 | 1.6 | 138.94 | 1.130 | 26.30 | 0.246 |
| 12 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 1.050 | 0.050 | 0.100 | 1.6 | 138.94 | 1.150 | 28.16 | 0.242 |
| 13 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.050 | 0.850 | 0.100 | 0.250 | 1.6 | 138.94 | 0.900 | 26.70 | 0.309 |
| 14 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.025 | 0.850 | 0.100 | 0.250 | 1.6 | 138.94 | 0.810 | 29.65 | 0.343 |
| 15 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.000 | 0.850 | 0.100 | 0.250 | 1.6 | 138.94 | 0.720 | 33.35 | 0.386 |
| 16 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 0.600 | 0.500 | 0.100 | 1.6 | 138.94 | 1.060 | 21.74 | 0.262 |
| 17 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 0.500 | 0.600 | 0.100 | 1.6 | 138.94 | 1.040 | 20.95 | 0.267 |
| 18 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.100 | 0.400 | 0.700 | 0.100 | 1.6 | 138.94 | 1.020 | 20.41 | 0.272 |
| 19 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.050 | 0.600 | 0.500 | 0.100 | 1.6 | 138.94 | 0.890 | 26.44 | 0.262 |
| 20 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.050 | 0.500 | 0.600 | 0.100 | 1.6 | 138.94 | 0.880 | 26.02 | 0.267 |
| 21 | 1.5 | 2.4 | 0.300 | 0.050 | 0.400 | 0.700 | 0.100 | 1.6 | 138.94 | 0.870 | 25.77 | 0.272 |

$$M_{dr}^+ = \gamma_i P_d \frac{\{L_p - (0.5b_r + y_1)\}}{4} = 15.30 \text{ kN} \quad (4)$$

2.2 상세 해석

Fig. 3과 같은 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목에 대해, 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 휨 응력 및 휨 모멘트를 산정하였다. 해석 시 적용된 설계하중은 KR C-08020에 정의된 KRL-2012 표준열차하중이다. 동적증가계수(Dynamic amplitude factor)는 $(1+\gamma_v)$ 이므로 1.979가 되며 이를 설계하중에 곱하였다. 상세 해석 모델링 및 하중 재하는 Fig. 4와 같다. 레일과 침목은 스프링($k_{dm} = 30 \text{ kN/mm}$)으로 연결되며, 침목과 아스팔트 도상은 friction contact 조건이 적용되었다. 이때 적용된 마찰계수는 0.7이며, 이는 실험으로부터 도출된 값이다(Lee et al., 2016). 강연선 배치 전 광폭 PSC침목에 동적증가계수가 적용된 하중이 침목에 재하될 때 침목에 발생하는 휨 인장응력은 Fig. 5(a)와 같다. 즉, 레일 좌면부 하단 및 침목 중앙부 상단에서 인장응력이 발생하며, 이 응력을 이용하여 설계모멘트를 계산하면 레일 좌면부 및 침

목 중앙부 각각 12.86 kN·m, -3.01 kN·m이다. 강연선 배치 후 동일한 설계하중이 침목에 작용될 때의 휨 인장응력은 Fig. 5(b)와 같다. 즉, 침목 중앙부는 강연선 적용으로 인해 휨 인장응력이 발생되지 않았으며, 레일 좌면부에 발생된 휨 인장응력 최대값은 0.587 MPa로서 프리스트레스가 적용된 콘크리트의 허용 휨 인장응력(침목의 설계압축강도 : 50 MPa) 4.45 MPa보다 매우 낮은 수준임을 알 수 있다. 상세 해석 시 도출된 설계모멘트는 형상 설계 시 계산된 설계모멘트와 차이를 보인다. 이는 형상 설계 시 적용된 모멘트 식이 자갈궤도에 기반을 두고 있어서 아스팔트 콘크리트 도상의 반력 특성을 반영하고 있지 못하며, 각 구성품간 경계 조건 및 하중 분배 양상을 실제적으로 구현하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 아스팔트 콘크리트 도상의 반력 특성 및 형상, $\gamma_i, \gamma_d, \gamma_r$ 등의 계수를 결정하기 위한 연구가 추가로 진행될 필요가 있다.

3. 설계 검증을 위한 성능시험

3.1 요구 성능 도출

아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목에 대한 설계 검증을 위해 성능 시험을 수행함에 있어, 먼저 성능 기준을 정립할 필요가 있으며, PSC침목에 대한 성능 기준은 EN 13230-2을 적용하였다. 즉, 레일 좌면부 및 침목 중앙부의 설계모멘트가 결정된다면 식 (5) 및 식(6)을 이용하여 침목 위치별 기준 시험하중을 산정하고 여기에 각 시험 항목별 증가계수를 곱하면 최종적인 성능 기준을 설정할 수 있다. L_r 및 L_c 는 각각 레일 좌면부 휨 강도 시험 시 지점 중심간 거리 및 침목 중앙부 휨 강도 시험 시 지점 중심간 거리이다. 아스팔트 콘크리트 궤

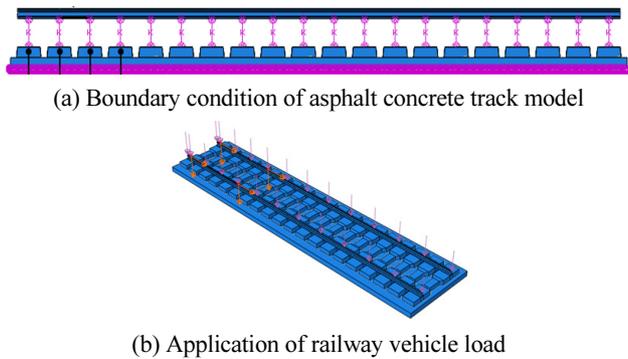


Fig. 4 Analysis model of asphalt concrete track

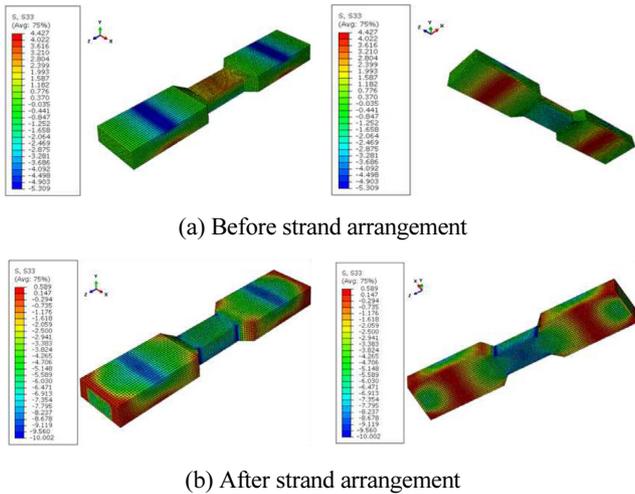


Fig. 5 Maximum flexural tensile stress in wide PSC sleeper

Table 2 Structural requirements of wide PSC sleeper for ACT

| Test items | Requirements |
|---------------------|--|
| Static test | |
| rail-seat section | $Fr_r > Fr_0 = 128.6 \text{ kN}$ $Fr_{0.05} > k_{1s} \times Fr_0 = 1.8 \times 128.6 = 231.5 \text{ kN}$ $Fr_B > k_{2s} \times Fr_0 = 2.5 \times 128.6 = 321.5 \text{ kN}$ |
| center section | $FC_{rn} > FC_{0n} = 8.56 \text{ kN}$ |
| Dynamic test | |
| rail-seat section | $Fr_{0.05} > k_{1d} \times Fr_0 = 1.5 \times 128.6 = 192.9 \text{ kN}$ $Fr_{0.50} > k_{2d} \times Fr_0 = 2.2 \times 128.6 = 282.9 \text{ kN}$ |
| Fatigue test | |
| rail-seat section | $Fr_r > Fr_0 = 128.6 \text{ kN}$ Crack width loaded(= Fr_0): Below 0.1 mm Crack width unloaded: Below 0.05 mm $Fr_B > k_3 \times Fr_0 = 2.5 \times 128.6 = 321.5 \text{ kN}$ |

도용 광폭 PSC침목의 경우 L_r 은 0.5 m 이며, L_c 는 1.5 m이다. 증가계수 k_{1s} , k_{2s} , k_{1d} , k_{2d} , k_3 는 prEN 13230-6에 정의되어 있으며, 상세 해석을 통해 도출된 설계모멘트를 식 (5) 및 식 (6)에 적용할 경우 아스팔트 궤도용 광폭 PSC침목의 성능 기준은 Table 2와 같다(Bae and Lee, 2015). 여기서, Fr_r 은 레일 좌면부에서 최초 균열 발생 시 하중, $Fr_{0.05}$ 는 레일 좌면부에서 하중(정하중 또는 동하중)이 제거된 상태에서 균열폭이 0.05 mm 일 때의 최대 하중, $Fr_{0.50}$ 는 동하중이 제거된 상태에서 균열폭이 0.50 mm일 때의 최대 하중, Fr_B 는 레일 좌면부에서 파괴 시 하중이며, Fc_{0n} 은 침목 중앙부에서 최초 균열 발생 시 하중이다. 균열폭은 EN 13230-2에 정의된 바와 같이 하중 제거 후에 측정되는데, 이는 철도 운행환경 특성 상 열차 하중이 가해지는 시간보다 열차 통과 후 비하중 재하 상태의 시간의 훨씬 길기 때문에 이를 고려하기 위한 것으로 판단된다.

$$Fr_0 = \frac{4M_{dr^+}}{L_r - 0.1} = \frac{4 \times 12.86}{0.5 - 0.1} = 128.6 \text{ kN} \quad (5)$$

$$Fc_{0n} = \frac{4M_{dc^-}}{L_c - 0.1} = \frac{4 \times 3.01}{1.5 - 0.1} = 8.56 \text{ kN} \quad (6)$$

3.2 정적 휨 강도 시험

3.2.1 레일 좌면부

레일 좌면부는 열차 하중이 직접 가해지는 단면이므로, 이 단면에서 충분한 하중 저항 성능이 확보되어야 한다. 앞서 제시된 설계 결과를 바탕으로 제작된 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목 레일 좌면부의 설계 적합성을 확인하는 것은 필수적이며, 이를 위해 EN 13230-2에 따라 광폭 PSC침목을 Fig. 6(a)와 같이 설치한 후 Fig. 7에 정의된 하중 재하 절차를 적용하여 레일 좌면부에 대한 정적 휨 강도 시험을 수행하였다. 이때 지점 거리는 0.5 m로 설정되었는데, 이는 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목의 레일 좌면부 중심에서 침목 단부까지 거리가 0.446 m이며 이러한 경우 EN 13230-2에 정의된 지점 거리가 0.5 m이므로 이를 레일 좌면부 정적 휨 강도

시험에 적용하였다. 최초 균열 발생 하중(Fr_r)은 레일 좌면부 저면에서 상방향으로 15 mm 떨어진 지점까지 균열이 발생될 때의 하중을 의미한다. 균열폭은 단계별 재하된 하중이 제거된 후 측정되며 0.01 mm 단위까지 측정 가능한 휴대용 측미 현미경(제조회사: Peak, 20배율)이 사용되었다. 기준 시험하중(Fr_0)은 설계 결과가 반영되어 128.6 kN이 적용되었으며, 시험 하중은 레일 좌면부 단면이 더 이상 하중을 지지하지 못하는 지점(Fr_B)까지 재하되었다. 광폭 PSC침목 레일좌면부에 대한 설계 및 제작의 균일성을 확인하기 위하여 침목 6개(No.1~No.6)에 대해 시험을 수행하였다.

아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목 레일 좌면부의 정적 휨 강도 시험 결과는 Table 3과 같다. 균열 발생 양상은 Fig. 8(a) 및 Fig. 8(b)와 같으며, 최종 파괴 유형은 No.3 침목의 경우 휨·전단 파괴였고, 나머지 5개 침목은 휨 파괴였다. 또한 정적 하중 재하 단계별 균열폭은 Fig. 9와 같다. 침목 레일 좌면부 정적 휨 강도 시험 결과에서 알 수 있듯이, 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목은 EN 13230-2의 요구사항을 만족하고 있다. 특히 최대 균열폭이 0.05 mm일 때 하중($Fr_{0.05}$)과 최초 균열 발생 하중(Fr_r)의 차이가 최소 180 kN에서 최대 300 kN이며, 이는 침목에 최초 균열이 발생된다 하더라도 잔

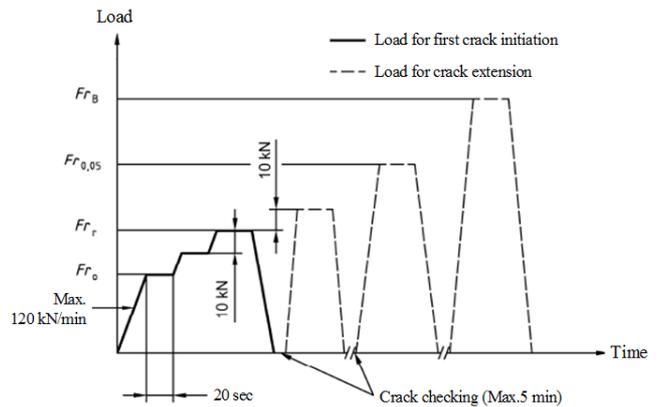


Fig. 7 Static test procedure at the rail-seat section for positive design approval test(Modified after EN 13230-2)

Table 3 Static test results for rail-seat section of wide PSC sleeper

| Specimen No. | Fr_r (kN) | $Fr_{0.05}$ (kN) | Fr_B (kN) |
|--------------|-------------|------------------|-------------|
| 1 | 528.6 | 808.6 | 818.6 |
| 2 | 407.2 | 707.2 | 817.2 |
| 3 | 408.6 | 648.6 | 978.6 |
| 4 | 428.6 | 688.6 | 1,028.6 |
| 5 | 418.6 | 598.6 | 848.6 |
| 6 | 308.6 | 528.6 | 808.6 |
| Requirement | > 128.6 | > 231.5 | > 321.5 |



(a) Rail-seat section

(b) Center section

Fig. 6 Test arrangements for static load test

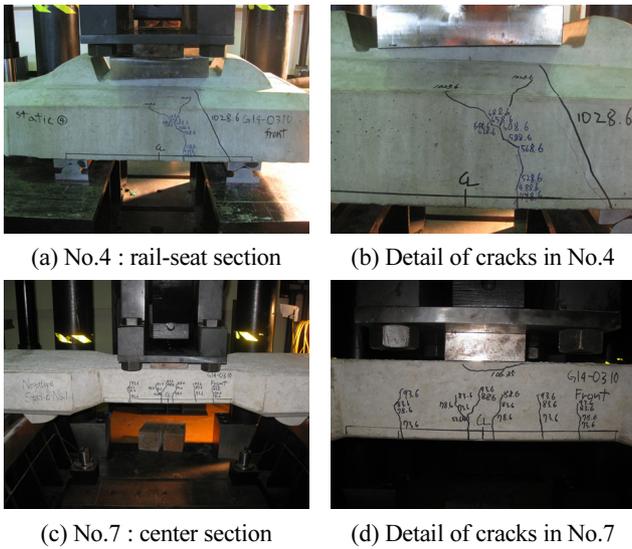


Fig. 8 Results of crack propagation after static tests

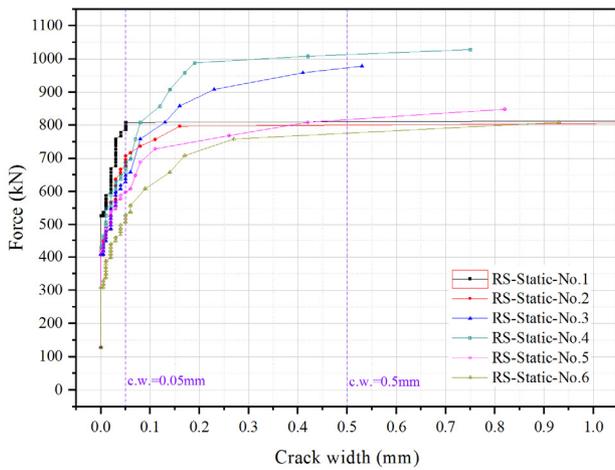


Fig. 9 Static test result : relationship of force-crack width

류 휨 강도의 감소가 작아서 균열폭의 확대를 지연시키고 있음을 의미한다. 다만, 침목 6개 모두 충분한 안전율을 보이고는 있으나, 각각의 침목별 Fr_r , $Fr_{0.05}$ 및 Fr_B 간의 편차가 존재하였다.

3.2.2 침목 중앙부

레일 좌면부에 열차 하중이 가해질 경우 아스팔트 콘크리트 도상반력에 의해 광폭 PSC 침목 중앙부 단면에 부모멘트가 작용될 수 있으므로, 침목 중앙부 단면이 부모멘트에 대한 저항 성능을 보유하고 있는지에 대한 확인이 필요하다. 이를 위해 EN 13230-2에 따라 아스팔트 콘크리트 광폭 PSC 침목을 Fig. 6(b)와 같이 설치한 후 Fig. 10에 정의된 하중 재하 절차를 적용하여 정적 휨 강도 시험을 수행하였다. 이때 지점 거리는 레일 좌면부 중심간 거리인 1.5 m이며 최초 균열 발생 하중(F_{Crn})은

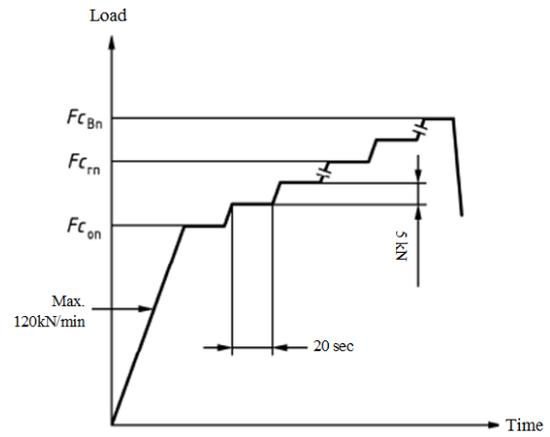


Fig. 10 Static test procedure at the center section for negative design approval test(Modified after EN 13230-2)

Table 4 Static test results for center section of wide PSC sleeper

| Specimen No. | F_{Crn} (kN) | F_{CBn} (kN) |
|--------------|----------------|----------------|
| 7 | 53.6 | 106.3 |
| 8 | 47.8 | 103.9 |
| 9 | 48.6 | 103.4 |
| Requirement | > 8.56 | - |

레일 좌면부 경우와 마찬가지로 저면에서 상방향으로 15 mm 떨어진 지점까지 균열이 발생될 때의 하중을 의미한다. 시험 하중은 침목 중앙부 단면이 더 이상 하중을 지지하지 못하는 지점(F_{CBn})까지 재하되었다. 광폭 PSC 침목 중앙부에 대한 설계 및 제작의 균일성을 확인하기 위하여 침목 3개(No.7~No.9)에 대해 시험을 수행하였다.

아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC 침목 중앙부의 정적 휨 강도 시험 결과는 Table 4와 같다. 균열 발생 양상은 Fig. 8(c) 및 Fig. 8(d)와 같으며, 최종 파괴 유형은 3개 침목 모두 휨 파괴였다. 침목 중앙부 정적 휨 강도 시험 결과에서 알 수 있듯이, 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC 침목은 EN 13230-2의 요구사항을 만족하고 있으며, 시험체별 최초 균열 발생 하중 및 파괴 하중이 매우 유사하여 균일함을 확인할 수 있다.

3.3 동적 휨 강도 시험

선로 선형 및 도상 상태에 따라 열차 운행 시 궤도에 동적 충격하중이 가해질 수 있다. 예상하지 못한 수준으로 동적 충격하중이 침목에 작용하게 되면, 레일 좌면부에 균열이 발생될 수 있으며 충격이 반복 재하될 경우 침목 파손으로 이어질 수 있다. 따라서 설계된 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC 침목 레일 좌면부의 동적 휨 강도를 확인하여야 한다. 이를 위해 정적 휨 강도 시험과 동일한 방법으로 침목 시험체를 설치한

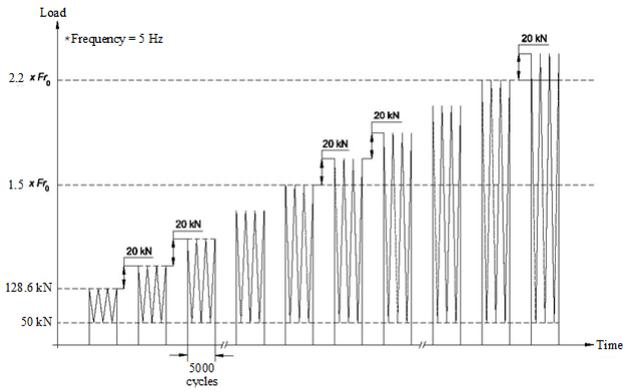


Fig. 11 Dynamic test procedure at the rail-seat section for positive design approval test(Modified after EN 13230-2)

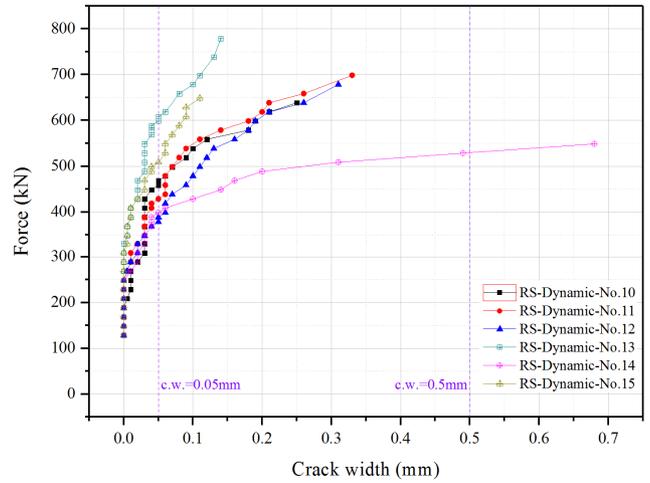


Fig. 13 Dynamic test result : relationship of force-crack width



(a) No.14 : rail-seat section (b) Detail of cracks in No.14

Fig. 12 Results of crack propagation after dynamic tests

Table 5 Dynamic test results for rail-seat section of wide PSC sleeper

| Specimen No. | Fr_r (kN) | $Fr_{0.05}$ (kN) | $Fr_{0.50}$ (kN) |
|--------------|-------------|------------------|------------------|
| 10 | 208.6 | 468.6 | 638.6 |
| 11 | 280.6 | 428.6 | 698.6 |
| 12 | 288.6 | 388.6 | 678.6 |
| 13 | 348.6 | 608.6 | 778.6 |
| 14 | 268.6 | 398.6 | 528.6 |
| 15 | 328.6 | 508.6 | 648.6 |
| Requirement | - | > 192.9 | > 282.9 |

후 Fig. 11에 정의된 하중 재하 절차를 적용하여 레일 좌면부에 대한 동적 휨 강도 시험을 수행하였다. 이때, 하중 단계별 동하중 재하 횟수는 EN 13230-2에 정의된 5,000회가 적용되었다. 균열폭은 단계별 재하된 동적 하중이 제거된 후 측정되었으며, 정적 휨 강도 시험과 마찬가지로 휴대용 측미현미경이 사용되었다. 동적 휨 강도 시험 시 설계 및 제작의 균일성을 확인하기 위하여 광폭 PSC침목 6개(No.10~No.15)에 대해 시험을 수행하였다.

아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목 레일 좌면부의 동적 휨 강도 시험 결과는 Table 5와 같으며, 균열 발생 양상은 Fig. 12와 같다. 또한 동적 하중 재하 단계별 균열폭은 Fig. 13

와 같다. 레일 좌면부 동적 휨 강도 시험 결과에서 알 수 있듯이, 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목은 EN 13230-2의 요구사항을 만족하고 있다. 동적 휨 강도 시험 시 최초 균열 하중이 정적 휨 강도 시험 시 최초 균열 하중보다 작게 평가되었는데, 이는 동적 휨 강도 시험 시 동하중이 5,000회씩 재하되며 동하중이 증가됨에 따라 단계별 하중이 누적되어 피로도가 증가했기 때문으로, 성능기준 설정 시 동하중에 대한 증가계수(k_d)가 정하중에 대한 증가계수(k_s) 보다 작은 이유가 여기에 있다 할 수 있다. 최대 균열폭이 0.05 mm일 때 하중($Fr_{0.05}$)과 최초 균열 발생 하중(Fr_r)의 차이가 최소 100 kN에서 최대 260 kN이다. 정적 휨 강도 시험과 마찬가지로 광폭 PSC침목 6개 모두 충분한 안전율을 보이고는 있으나, 각각의 침목별 Fr_r , $Fr_{0.05}$ 및 $Fr_{0.50}$ 간의 편차가 존재하였다.

3.4 피로 시험

아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목에 초기 균열이 발생할 경우, 열차 하중이 작용하지 않게 되면 침목 내 배치된 강연선으로 인해 균열이 닫히게 된다. 그러나 지속적인 열차 운행에 의해서 균열폭이 확장될 수 있으며, 균열폭 확대에 따른 침목 내구성능이 저하될 수 있다. 따라서 침목에 최초 균열 발생 후 반복하중 재하에 따른 균열폭 확대 및 휨 강도 변화 여부를 확인하기 위하여, Fig. 6(a)와 동일한 방법으로 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목 시험체를 설치한 후 EN 13230-2에 의거 피로 시험을 수행하였다. 반복하중 범위, 하중재하 횟수, 하중 적용 주파수 등 피로 시험절차는 Fig. 14와 같다. 여기서 첫 번째 사이클은 레일 좌면부 정적 휨 강도 시 최초 균열발생을 위한 단계별 하중 재하 방법이 적용된다.

200만회 반복하중 재하가 완료된 후 반복하중 재하에 따른 균열폭 확대 여부 및 균열 진전 상태를 확인하기 위하여, Fr_0

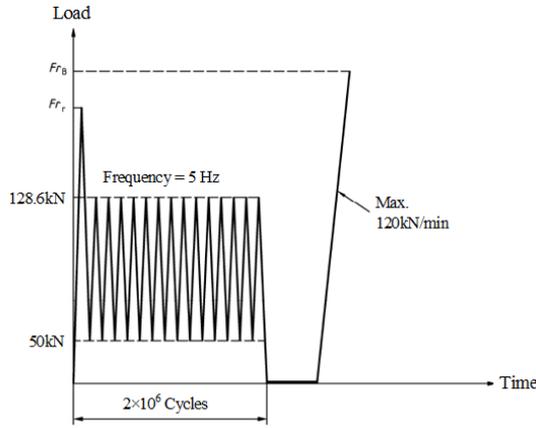


Fig. 14 Fatigue test procedure for wide PSC sleeper(Modified after EN 13230-2)

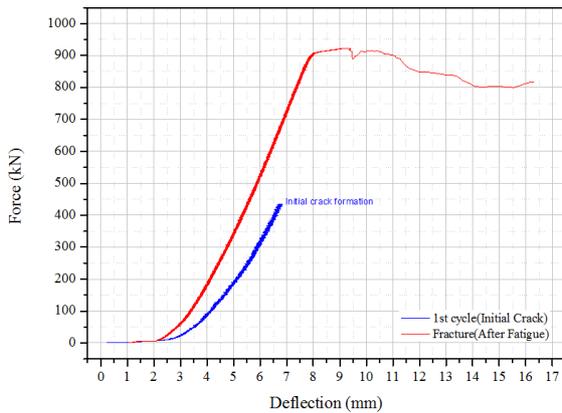


Fig. 15 Force-deflection curve of wide PSC sleeper at 1st cycle and fracture test after fatigue test

Table 6 Fatigue test results for wide PSC sleeper

| Specimen No. | Fr_r (kN) | Crack width at Fr_r (mm) | Crack width at unload(mm) | Fr_B (kN) |
|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-------------|
| 16 | 435.2 | Below 0.01 | Below 0.01 | 922.6 |
| Requirement | > 128.6 | ≤ 0.1 | ≤ 0.05 | > 321.5 |

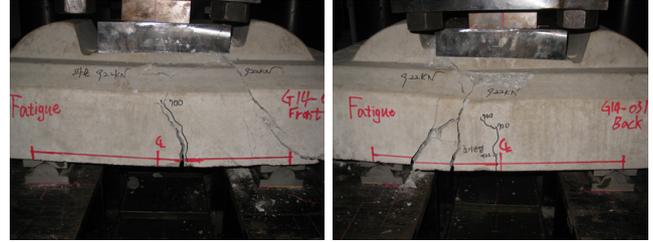
= 128.6 kN 하중이 재하된 상태 및 하중 제거 시 균열폭을 확인하였다. 그리고 반복하중 재하 후 광폭 PSC침목의 휨 강도 변화 여부를 확인하기 위하여 레일 좌면부에 정적 하중을 파괴 시까지 가하였다.

아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목의 피로 시험 결과는 Table 6과 같다. 또한 첫 번째 사이클에서 최초 균열 발생 시 및 피로 시험 후 파괴 시험 시 침목의 하중-처짐 곡선은 Fig. 15와 같다. 그리고 피로 시험 후 최초 균열 확장 여부를 확인하기 위한 균열 측정 및 파괴 시험 후 시험체 파괴 양상은 Fig. 16과 같다. 피로 시험 결과에서 알 수 있듯이, 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목은 EN 13230-2의 요구사항을 만족하



(a) No crack extension

(b) Zoom up



(c) Fracture shape : Front side

(d) Fracture shape : Back side

Fig. 16 Results of crack extension and fracture test after fatigue test

고 있음을 알 수 있다. 특히 200만회 반복하중 재하 후에 균열 폭이 확대되지 않았으며, Table 3의 Fr_B 와 비교했을 때 정적 휨 강도의 저하도 발생되지 않았음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 아스팔트 콘크리트 궤도(ACT)에 적용할 수 있는 광폭 PSC침목의 형상을 설계하고 유한요소해석을 통해 휨 인장응력 및 설계모멘트를 계산하였다. 또한 설계 적합성을 검증하기 위하여 EN 13230-2에 의거 정적 휨 강도, 동적 휨 강도 및 피로 시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 아스팔트 도상에 전달되는 압력 및 침목 저부 치수에 따른 침목 중앙부 부모멘트를 고려할 때, ACT용 광폭 PSC침목 저부의 적정 면적은 1.08 m²이다. 이때 침목 중앙부 저부 폭은 0.3 m, 높이는 0.14 m이며, 레일 좌면부 저부 폭은 0.5 m, 높이는 0.18 m이다.
- 2) ACT용 광폭 PSC침목에 대해 유한요소해석을 수행한 결과, 프리스트레스를 도입한 상태에서 설계하중이 가해질 때 침목 중앙부는 압축응력만 나타났으며 레일 좌면부는 휨 인장응력이 0.587 MPa로 계산되었는데, 이는 프리스트레스가 적용되는 콘크리트의 허용 휨 인장응력보다 매우 낮은 수준이다.
- 3) ACT용 광폭 PSC침목의 설계적합성을 확인하기 위하여 정적 휨 강도 시험, 동적 휨 강도 시험 및 피로 시험을 실시한 결과, 개발 침목은 EN 13230-2에서 요구되는 기준 항목

들을 모두 만족하였다. 특히 정적 휨 강도 및 동적 휨 강도 시험 결과, 최초 균열 발생 후 정적 시험에서는 180~300 kN, 동적 시험에서는 100~180 kN 하중이 더 가해져야 균열폭 0.05 mm를 확인할 수 있었다. 이는 개발 광폭 PSC침목이 잔류 휨 강도의 감소가 작아 균열 지연 능력을 가지고 있다고 판단된다.

- 4) 피로 시험 결과, 200만회 반복하중 재하 전· 후에 균열폭 확대는 관찰되지 않았다. 또한 피로 시험 후 정적 파괴시험을 실시한 결과 피로 시험 전 대비 정적 휨 강도의 저하도 발생되지 않았다.
- 5) 형상 설계 시 적용된 UIC 713R의 설계모멘트 식은 자갈궤도에 기반을 두고 있어서 아스팔트 콘크리트 도상의 반력 특성, 각 구성품간 경계 조건 및 하중 분배 양상, 동적 하중의 증가 양상 등을 실제적으로 구현하지 못하고 있다. 따라서 ACT용 침목의 설계 편의성을 위해 아스팔트 콘크리트 도상의 반력 특성 및 반력 형상, γ_i , γ_d , γ_r 등의 계수를 결정하기 위한 추가 연구 수행이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bae, Y. H. and Lee, S. H. (2015), Performance Evaluation of Wide Sleepers on Asphalt Track in High-Speed Railroad, *Proceedings of the 2015 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Mokpo, 1367-1371.
- European Committee for Standardization(CEN) (2014), Railway applications-Track-Concrete sleepers and bearers-Part 6: Design(prEN 13230-6), CEN, Brussels, 5-22.
- European Committee for Standardization(CEN) (2016), Railway applications-Track-Concrete sleepers and bearers-Part 2: Prestressed monoblock sleepers (EN 13230-2), CEN, Brussels, 5-22.
- International Union of Railways(UIC) (2004), Design of monoblock concrete sleepers(UIC 713R), UIC, Paris, 4-12.
- Korea Rail Network Authority(KRNA) (2014), Railway design guideline and handbook-Ballsted track structure(KR C-14030), KRNA, Dajeon, 15-19.
- Korea Rail Network Authority(KRNA) (2016), Railway design guideline and handbook-Load (KR C-08020), KRNA, Dajeon, 22-25.
- Korea Railroad Research Institute(2014), Development of Asphalt Roadbed and Track System Suited to Speed Up(3rd year), Korea Railroad Research Institute, Uiwang, 127-129.
- Korea Railroad Research Institute (2016), Development of Asphalt Roadbed and Track System Suited to Speed Up(5th year), Korea Railroad Research Institute, Uiwang, 123-125, 150-160.
- Korean Agency for Technology and Standards (2005), Testing Method for the Compressive Strength of Asphalt Mixtures (KS F 2531), Korean Standard Association, Seoul, 1-4.
- Lee, S. H., Yoon, W. Y., and Bae, Y. H. (2016), Development of Device to Resist Horizontal Displacement of Asphalt Concrete Track, *Journal of the Korean Society for Railway*, 19(6), 744-754.

Received : 09/18/2017

Revised : 10/18/2017

Accepted : 11/01/2017

요 지 : 아스팔트 콘크리트 궤도(ACT)의 변형을 최소화하고 구조적 안전성을 확보하기 위해서는, 열차 하중을 분산 및 저감시킬 수 있고 아스팔트 도상의 노출을 줄일 수 있는 광폭 형태의 콘크리트 침목이 필요하다. 본 연구에서는 형상 설계를 통해 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목을 개발하였으며, 유한요소해석을 통해 레일 좌면부 및 침목 중앙부에 대한 구조 안전성을 검토하였다. 또한 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목의 설계 적합성을 검증하기 위하여, EN 13230-2에 의거 침목 주요 위치별로 정적 휨 강도 시험, 동적 휨 강도 시험 및 피로 시험을 수행하였다. 성능 시험 결과, 아스팔트 콘크리트 궤도용 광폭 PSC침목은 균열 하중, 파괴 하중, 및 균열 확대 여부 등 유럽 표준에서 요구되는 성능 기준을 모두 충족하였다.

핵심용어 : 아스팔트 콘크리트 궤도, 광폭 PSC침목, 침목 설계, 설계 승인 시험, 설계 적합성
