

온도변화에 따른 PSC침목 휨 거동 분석

Temperature-Induced Flexural Behavior of Prestressed Concrete Sleeper

배영훈[†], 황성호*, 박범호**Young-Hoon Bae[†], Sung-Ho Hwang*, Beom-Ho Park**

Abstract Curling due to temperature change has been widely studied in concrete pavements, concrete slab track, however, it has not been investigated in the curling behavior of prestressed concrete sleepers. As high speed trains pass through the ballasted track where curling of PSC sleepers occurs in due to the daily temperature gradient, bending moment not considered in design may additionally occur in the rail seat and center section of sleeper. In this study, some strain gauges and thermocouples are installed in the PSC sleeper on the high speed railway, and then flexural behavior of the main sections was checked. As a result of the analysis, the curling and moment variation for the PSC sleeper according to temperature change were confirmed.

Keywords : Temperature variation, Prestressed concrete sleeper, Flexural behavior

초 록 콘크리트 포장, 프리캐스트 슬래브 궤도의 경우 온도변화에 따른 컬링 현상에 대해 많은 연구가 이루어져 왔으나, PSC침목에 대한 컬링 현상은 초기 연구단계에 머물러 있다. 일별 온도변화에 따라 PSC침목에 컬링 현상이 발생한 상태에서 열차가 고속으로 주행할 경우 레일 좌면부 및 침목 중앙부에 설계 시 고려되지 않은 휨 모멘트가 추가로 발생할 수 있다. 본 연구에서는 고속철도 토공구간에 부설된 PSC침목 상하면 각각에 5개씩의 변형률계 및 1개씩의 온도 센서를 설치한 후, 온도변화 및 열차주행에 따른 침목 주요 단면(레일 좌면부 및 침목 중앙부)의 휨 거동을 분석하였다. 분석 결과 온도변화에 따른 PSC침목의 컬링 현상 및 휨 모멘트 변화를 확인하였다.

주요어 : 온도변화, PSC침목, 휨 거동

1. 서 론

콘크리트 포장, 프리스트레스트 콘크리트 교량 거더 및 콘크리트 슬래브 궤도에서 온도 변화에 따른 컬링(curling) 현상을 이해하는 것은 콘크리트 부재 설계 및 사용성 측면에서 매우 중요하며 이에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 철도 궤도분야의 중요 구성품인 프리스트레스트 콘크리트 침목(PSC침목)의 컬링 연구는 초기 단계에 머물러 있다.

일반적으로 콘크리트 부재는 상면 보다 하면의 온도가 높을 경우 하면의 변형률이 상면에 비해 상대적으로 커지면서 하방향 컬링이 발생하며, 이와 반대일 경우 상방향 컬링이 발생한다. 자갈도상과의 마찰 정도에 따라 차이가 있겠으나 PSC침목도 매일의 외기 변화에 따라 상방향 또는 하방향 컬링이 발생할 수 있다.

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

* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

** 충남대학교 토목공학과

새벽부터 이른 아침 또는 저녁 시간 이후에는 PSC침목 상면에 비해 하면이 온도가 높을 것이므로 Fig. 1 (b)와 같이 하방향 컬링이 발생할 수 있으며, 오전부터 낮 시간 동안에는 PSC침목 상면의 온도가 하면에 비해 높을 것이므로 Fig. 1 (c)와 같이 하방향 컬링이 발생할 수 있다. 이렇게 외기 변화에 따라 컬링이 발생한 상태에서 열차하중이 통과할 경우 컬링이 발생하지 않은 침목과는 다른 양상의 휨 거동이 예상된다. 즉, 상방향 컬링이 발생한 침목은 마치 솟음(camber)이 부여된 상태와 같아서 침목 중앙부 및 인근 면의 경우 자갈도상과 접촉되지 않은 부분이 생기므로 열차가 통과할 경우 컬링이 발생하지 않은 침목에 비해 침목 중앙부의 모멘트는 감소하고 레일 좌면부의 모멘트는 증가할 수 있다[1]. 하방향 컬링이 발생한 침목은 상방향 컬링이 발생한 침목과는 반대 경향의 모멘트 거동이 나타날 수 있기 때문에 이에 대한 확인이 필요하다.

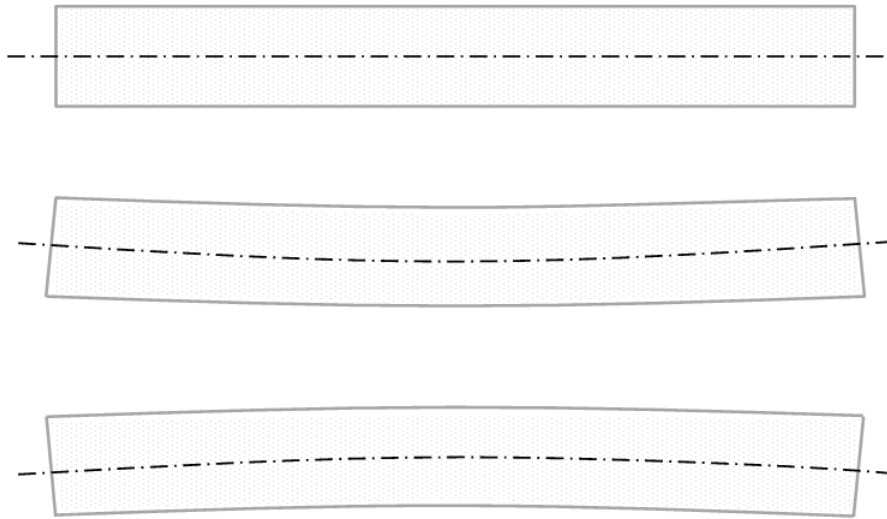


Fig. 1 Concept drawings of prestressed concrete sleeper curling geometry

2. 본 론

2.1 계측 센서 설치

PSC침목의 컬링에 따른 열차 운행 시 휨 거동을 파악하기 위해 경부고속철도 오송역 인근 자갈도상(토공구간)에서 Fig. 2와 같이 침목 상면 및 하면에 콘크리트용 변형률 게이지(PL-60-11-1L, TML) 및 온도 센서를 설치하였다. 변형률 게이지는 침목 상면 및 하면으로부터 20 mm 떨어진 지점에 부착되었다. 고속열차 운행 시 측정된 레일 좌면부 및 침목 중앙부 변형률(ϵ'_c , ϵ'_t)을 통해, Fig. 3과 같이 레일 좌면부 하면 인장변형률($\epsilon_{t,rs}$) 및 침목 중앙부 상면 인장변형률($\epsilon_{t,\alpha}$)을 계산하였으며, 이렇게 계산된 변형률을 식(1)에 대입하여 인장부 모멘트를 계산하였다.

$$M_t = \epsilon_t EI / (y + 20) \quad (1)$$

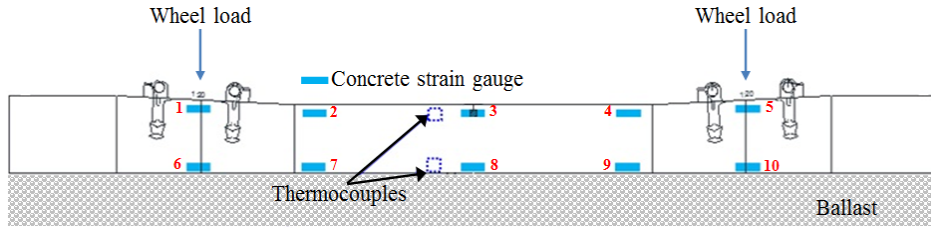
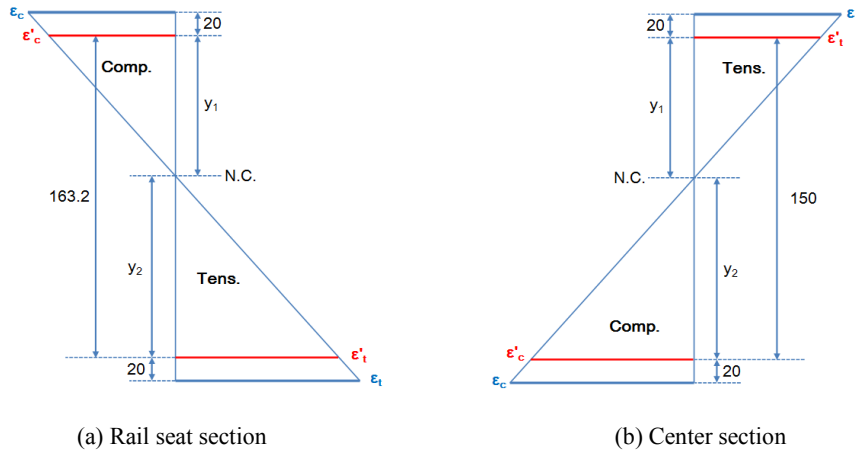


Fig. 2 Arrangement of strain gauges and thermocouples in field experiment



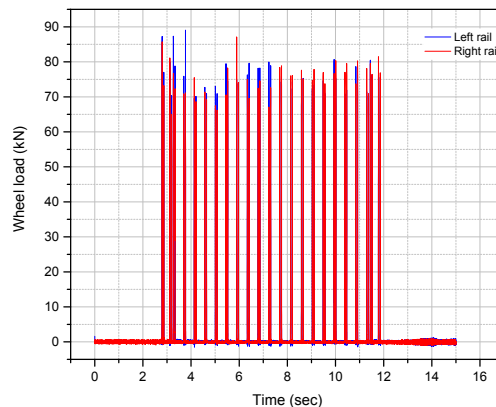
(a) Rail seat section

(b) Center section

Fig. 3 Strain distribution for rail seat and center section of concrete sleeper

2.2 측정 결과 및 PSC침목 휨 거동 분석

2017년 3월 10일 오전 6시부터 3월 11일 0시 35분까지 운행된 고속 열차 중 13대에 대해 레일 좌면부 좌측 및 우측의 운중을 측정하였으며, 측정된 운중의 예는 Fig. 4와 같다. 또한 PSC침목에 컬링 현상이 발생한 상태에서 고속열차 주행 시 측정된 레일 좌면부 및 침목 중앙부의 변형률 예는 Fig. 5와 같다. 고속열차 13회 주행 시 측정된 온도, 운중 최대값, 센서 부착 위치에서의 변형률 최대값, 계산된 모멘트는 Table 1 ~ Table 3과 같다.



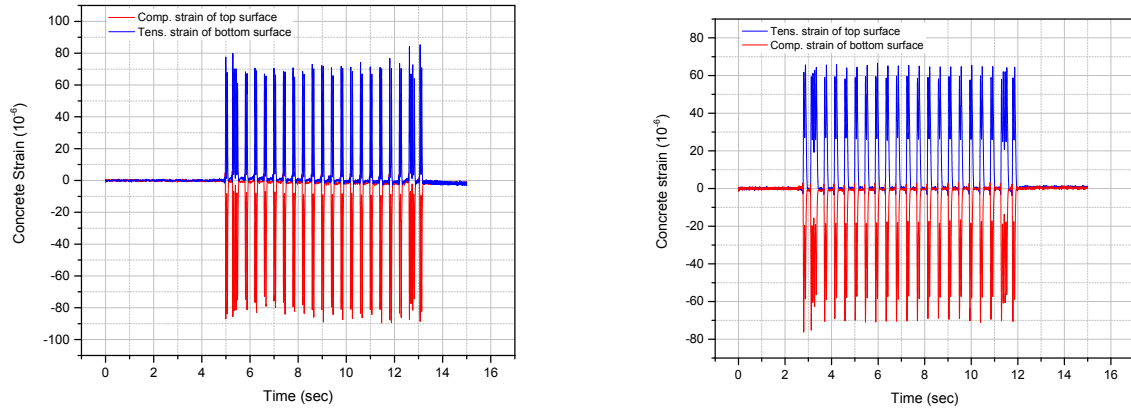


Fig. 5 Strain measured in field experiment

PSC침목 레일 좌면부 및 침목 중앙부에서 측정된 변형률을 살펴보면 온도의 일변화에 따른 컬링이 발생하였으며, 침목의 상방향 또는 하방향 컬링 변형 상태에서 고속열차 주행에 따른 인장부 모멘트가 시간에 따라 변화됨을 알 수 있으며 변화 양상은 Fig. 6과 같다.

침목 중앙부의 경우 오전 8시 이전 및 오후 6시 이후에 측정된 부모멘트가 낮 시간에 측정된 부모멘트 보다 최대 4.39 kN·m 컸으며, 레일 좌면부의 경우 낮 시간에 측정된 정모멘트가 오전 8시 이전 및 오후 6시 이후에 측정된 정모멘트 보다 최대 3.52 kN·m 컸다.

레일 좌면부 및 침목 중앙부에서 계산된 일별 최대 모멘트는 설계모멘트 대비 50% ~ 60% 수준임을 알 수 있다.

Table 1 Maximum positive tensile moment of bottom surface at left rail seat

| Date and time | Temperature of top surface (°C) | Temperature of bottom surface (°C) | Wheel load, left rail seat (kN) | Wheel load, right rail seat (kN) | ϵ'_c (10^{-6}) | ϵ'_t (10^{-6}) | Mt (kN·m) |
|---------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| 06:08, 3/10 | -2.62 | -0.44 | 72.75 | 67.87 | -39.96 | 43.71 | 4.64 |
| 06:44, 3/10 | -2.54 | -0.48 | 87.60 | 81.11 | -40.63 | 58.33 | 6.63 |
| 07:28, 3/10 | -2.13 | -0.71 | 84.29 | 84.03 | -45.69 | 61.84 | 6.69 |
| 09:21, 3/10 | 4.44 | -0.79 | 87.44 | 81.29 | -63.63 | 65.27 | 6.00 |
| 10:51, 3/10 | 11.81 | 2.66 | 89.08 | 84.74 | -81.47 | 76.56 | 6.51 |
| 14:42, 3/10 | 19.16 | 13.92 | 78.41 | 75.71 | -65.85 | 80.98 | 7.82 |
| 15:38, 3/10 | 16.70 | 14.06 | 77.20 | 85.46 | -59.49 | 74.97 | 7.46 |
| 17:35, 3/10 | 13.31 | 12.98 | 86.47 | 77.29 | -49.60 | 60.72 | 6.24 |
| 18:53, 3/10 | 10.20 | 11.74 | 77.74 | 65.90 | -51.50 | 52.97 | 5.14 |
| 20:40, 3/10 | 7.61 | 9.61 | 87.24 | 85.71 | -45.17 | 54.54 | 5.72 |
| 22:53, 3/10 | 4.94 | 7.37 | 70.07 | 69.76 | -44.00 | 48.95 | 5.06 |
| 23:38, 3/10 | 4.33 | 6.89 | 77.51 | 65.05 | -44.85 | 49.86 | 5.13 |
| 00:35, 3/11 | 3.52 | 5.93 | 74.42 | 70.78 | -44.44 | 46.83 | 4.77 |

Table 2 Maximum positive tensile moment of bottom surface at right rail seat

| Date and time | Temperature of top surface (°C) | Temperature of bottom surface (°C) | Wheel load, left rail seat (kN) | Wheel load, right rail seat (kN) | ϵ'_c (10^{-6}) | ϵ'_t (10^{-6}) | Mt (kN·m) |
|---------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| 06:08, 3/10 | -2.62 | -0.44 | 72.75 | 67.87 | -53.67 | 39.84 | 3.62 |
| 06:44, 3/10 | -2.54 | -0.48 | 87.60 | 81.11 | -68.29 | 60.60 | 5.29 |
| 07:28, 3/10 | -2.13 | -0.71 | 84.29 | 84.03 | -65.67 | 61.23 | 5.45 |
| 09:21, 3/10 | 4.44 | -0.79 | 87.44 | 81.29 | -79.71 | 71.79 | 6.06 |
| 10:51, 3/10 | 11.81 | 2.66 | 89.08 | 84.74 | -93.16 | 85.36 | 7.02 |
| 14:42, 3/10 | 19.16 | 13.92 | 78.41 | 75.71 | -89.57 | 85.25 | 7.14 |
| 15:38, 3/10 | 16.70 | 14.06 | 77.20 | 85.46 | -83.78 | 74.83 | 6.24 |
| 17:35, 3/10 | 13.31 | 12.98 | 86.47 | 77.29 | -70.33 | 59.22 | 5.07 |
| 18:53, 3/10 | 10.20 | 11.74 | 77.74 | 65.90 | -62.61 | 46.68 | 4.04 |
| 20:40, 3/10 | 7.61 | 9.61 | 87.24 | 85.71 | -65.29 | 57.89 | 5.11 |
| 22:53, 3/10 | 4.94 | 7.37 | 70.07 | 69.76 | -56.00 | 45.68 | 4.14 |
| 23:38, 3/10 | 4.33 | 6.89 | 77.51 | 65.05 | -52.24 | 41.67 | 3.85 |
| 00:35, 3/11 | 3.52 | 5.93 | 74.42 | 70.78 | -52.64 | 40.36 | 3.71 |

Table 3 Maximum negative tensile moment of top surface at center section

| Date and time | Temperature of top surface (°C) | Temperature of bottom surface (°C) | Wheel load, left rail seat (kN) | Wheel load, right rail seat (kN) | ϵ'_c (10^{-6}) | ϵ'_t (10^{-6}) | Mt (kN·m) |
|---------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| 06:08, 3/10 | -2.62 | -0.44 | 72.75 | 67.87 | -72.20 | 69.99 | 5.30 |
| 06:44, 3/10 | -2.54 | -0.48 | 87.60 | 81.11 | -78.98 | 67.98 | 5.55 |
| 07:28, 3/10 | -2.13 | -0.71 | 84.29 | 84.03 | -75.39 | 67.22 | 5.37 |
| 09:21, 3/10 | 4.44 | -0.79 | 87.44 | 81.29 | -42.21 | 39.60 | 3.06 |
| 10:51, 3/10 | 11.81 | 2.66 | 89.08 | 84.74 | -14.95 | 16.44 | 1.16 |
| 14:42, 3/10 | 19.16 | 13.92 | 78.41 | 75.71 | -32.68 | 25.37 | 2.22 |
| 15:38, 3/10 | 16.70 | 14.06 | 77.20 | 85.46 | -51.75 | 43.38 | 3.61 |
| 17:35, 3/10 | 13.31 | 12.98 | 86.47 | 77.29 | -66.56 | 54.70 | 4.61 |
| 18:53, 3/10 | 10.20 | 11.74 | 77.74 | 65.90 | -70.82 | 61.92 | 5.01 |
| 20:40, 3/10 | 7.61 | 9.61 | 87.24 | 85.71 | -76.15 | 66.65 | 5.39 |
| 22:53, 3/10 | 4.94 | 7.37 | 70.07 | 69.76 | -74.41 | 63.65 | 5.22 |
| 23:38, 3/10 | 4.33 | 6.89 | 77.51 | 65.05 | -72.22 | 65.38 | 5.17 |
| 00:35, 3/11 | 3.52 | 5.93 | 74.42 | 70.78 | -69.82 | 66.28 | 5.09 |

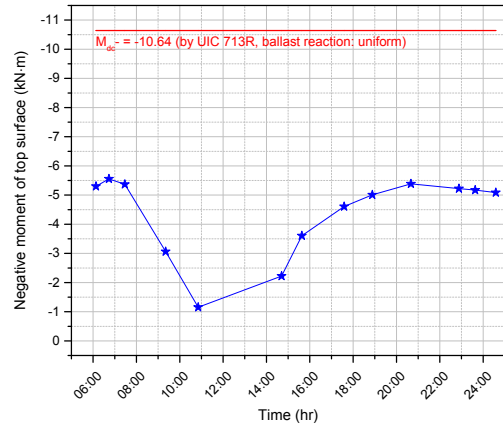
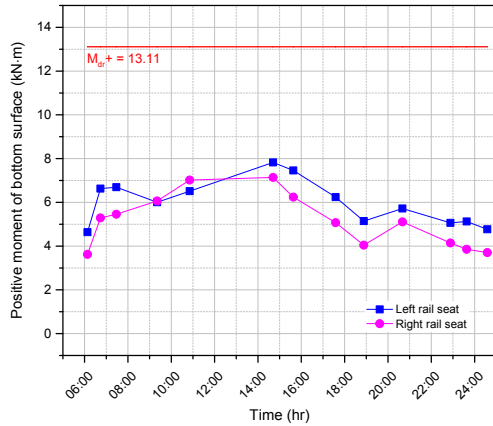


Fig. 6 Temperature-induced flexural moment of rail seat and center section in PSC sleeper

3. 결론

본 논문에서는 고속철도 자갈도상에 부설된 PSC침목의 일별 온도 변화에 따라 상방향 또는 하방향 컬링 발생을 확인하기 위해, 운중, 침목 상·하면의 변형률 및 온도를 측정하였다. 측정 및 거동 분석 결과, 온도에 변화에 따른 침목의 컬링 발생을 확인하였으며 컬링 변형 상태에서 고속 열차가 주행할 경우 일별 측정시간에 따라 레일 좌면부는 최대 3.52 kN.m, 침목 중앙부는 최대 4.39 kN.m만큼의 모멘트 차이가 발생함을 알 수 있었다.

따라서 PSC침목 설계 시 일별 온도변화에 따른 모멘트 변동성을 설계에 반영할 수 있도록 이와 관련한 계수가 도입될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 “고속철도 자갈궤도 궤도구조 개량 기술개발”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Henry E. Wolf, Yu Qian, J. Riley Edwards, Marcus S. Dersch et al. (2016) Temperature-induced curl behavior of prestressed concrete and its effect on railroad cross-ties, *Construction and Building Materials*, 115, pp. 319-326.