

# 슬라이딩 궤도 콘크리트 슬래브의 동절기 균열 검토

## Estimation of Cold-Weather-Cracking at Concrete Slab for Sliding Slab Track

이경찬\*<sup>†</sup>, 이성철\*\* , 장승엽\* , 여인호\*

Kyoung-Chan Lee\*<sup>†</sup>, Seong-Cheol Lee\*\* , Sung Yup Jang\* , Inho Yeo\*

**Abstract** Sliding slab track is a new type of slab track system enabling to reduce interaction between railway bridge and track by means of a low-frictional sliding layer. The slab is a continuously reinforced structure all over the bridge region including neighboring abutment and approaches, which becomes the similar type of CRCT as a conventional slab track in embankment region. This kind of slab tracks may exhibit cracks due to tension through the entire cross-section of slab when the ambient temperature is low in winter. In this paper, therefore, based on EN 1992-1-1 and CIRIA C660, crack spacing and crack width in winter have been theoretically examined with the consideration of concrete creep and shrinkage, and low ambient temperature. The results indicated that the predicted crack width is within the allowable limit provided by the design codes when the sleeper net spacing is considered as crack spacing, since cracks are induced at the interfaces between slabs and sleepers.

**Keywords** : sliding slab track, continuously reinforced concrete track(CRCT), railway bridge, crack spacing, crack width control

**초 록** 슬라이딩 궤도는 궤도 슬래브와 교량 바닥판 상면 사이에 저마찰 슬라이드층을 두어 궤도-교량 상호작용을 원천적으로 저감시킬 수 있는 새로운 형태의 궤도 시스템이다. 슬라이딩 궤도의 슬래브는 교량구간에 대해서도 일반적인 토공노반 구간의 콘크리트 궤도와 동일한 연속철근콘크리트 궤도(CRCT)의 형식을 취한다. 이러한 형태의 궤도 슬래브는 동절기 온도 하강시에 슬래브 전단면에 인장력이 재하되어 콘크리트에 균열이 필연적으로 발생하므로, 콘크리트의 수축과 크리프의 영향을 비롯하여 동절기 온도 하강시 발생할 수 있는 균열 간격과 균열폭을 유로코드 (EN 1992-1-1)와 CIRIA C660 보고서에 제시된 방법에 따라 검토하였다. 검토 결과 최대 균열간격에 대하여 허용 균열폭을 초과할 수 있으나, 침목과 슬래브가 접하는 면에서 신규 콘크리트 접합으로 인하여 선균열이 유도되므로, 침목간 순 간격을 고려할 시 허용 균열폭을 만족함을 확인하였다.

**주요어** : 슬라이딩 콘크리트 궤도, 연속철근콘크리트궤도(CRCT), 철도교량, 균열간격, 균열폭 제어

## 1. 서 론

장대레일(Continuous Welded Rail, CWR)은 부동구간에서 온도변화 시 레일의 자유 팽창 및 수축이 구속되므로 레일의 길이방향으로 과도한 축력이 발생할 수 있어 레일의 축력에 주의할 필요가 있다. 특히 교량 구간에서 궤도와 교량간의 상호작용으로 인해 레일에 부가적인

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

\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 첨단인프라연구팀

\*\* 국제원자력대학원대학교 원자력산업학과

응력이 크게 발생할 수 있다. 이러한 상호작용으로 인한 부가 축력을 근본적으로 해결하기 위해 궤도와 교량 사이에 저마찰 슬라이딩 층을 두어 상호작용 효과를 저감시킬 수 있는 슬라이딩 궤도에 관한 연구가 최근 진행되고 있다[1-2].

슬라이딩 궤도의 궤도 슬래브는 일반적인 토공노반 구간의 콘크리트 궤도와 동일한 연속 철근콘크리트 궤도(CRCT)의 형식을 취한다. 이러한 형태의 궤도 슬래브는 동절기 온도 하강시에 슬래브 전단면에 인장력이 재하되어 콘크리트에 균열이 필연적으로 발생하므로, 콘크리트의 수축과 크리프의 영향을 비롯하여 동절기 온도 하강시 발생할 수 있는 균열 간격과 균열폭을 검토하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 침묵으로 인해 유발된 균열간격을 고려하여 Eurocode 2(EN 1992-1-1)[3]와 CIRIA C660 보고서[4]를 토대로 슬라이딩 궤도 슬래브에서의 동절기 균열폭을 검토하고자 한다.

## 2. 구속 응력을 고려한 균열폭 산정 방안

### 2.1 구속 효과를 고려한 콘크리트 변형률

콘크리트 구조물은 구속효과 등에 의해 유발된 인장변형률( $\epsilon_r$ )이 균열 발생 직전까지 콘크리트가 저항할 수 있는 최대 인장변형률( $\epsilon_{cu}$ )보다 큰 경우 균열이 발생한다. 구속효과를 고려한 콘크리트 변형률( $\epsilon_r$ )은 구속도( $R$ )와 구속이 없을 때 발생할 수 있는 콘크리트 변형률( $\epsilon_{free}$ )의 곱으로 얻어지며, 여기에 더하여 계절별 온도 변화 및 콘크리트 수화열, 그리고 콘크리트의 자기수축 및 건조수축 등을 고려하여 다음의 식(1)로부터 산정할 수 있다.

$$\epsilon_r = K_1 \{ [\alpha_c T_1 + \epsilon_{ca}] R_1 + \alpha_c T_2 R_2 + \epsilon_{cd} R_3 \} \quad (1)$$

여기서,  $T_1$ 은 콘크리트 수화열에 의한 최대 상승 온도와 외기온도와의 차이,  $T_2$ 는 장기간의 온도변화로서 동절기 효과를 의미한다. 또한,  $\epsilon_{ca}$  및  $\epsilon_{cd}$ 는 콘크리트의 자기수축과 건조수축을,  $\alpha_c$ 는 콘크리트 열팽창계수를 의미하며,  $R_1$ ,  $R_2$ , 그리고  $R_3$ 는 각 항목에 대한 구속 효과를 나타낸다.  $K_1$ 은 콘크리트의 크리프와 릴랙세이션 효과를 고려하기 위한 계수이다.

### 2.2 균열 간격

구조물에 발생한 인장응력에 의해 자연스럽게 균열이 발생할 경우 균열 안정화 단계에 대해 Eurocode 2[3]에서는 최대 균열 간격을 다음의 식(2)와 같이 제시한다.

$$S_{r,max} = 3.4c + 0.425 \frac{k_1 d_b}{\rho_{eff}} \quad (2)$$

여기서,  $c$ 는 철근의 피복두께,  $d_b$ 는 철근의 지름,  $\rho_{eff}$ 는 유효 철근비를 나타내며,  $k_1$ 은 철근의 부착을 고려하는 계수로서 이형철근에 대해 0.8을 사용한다. 콘크리트 침묵이 콘크리트 슬래브에 매립되어 별도로 타설된 슬라이딩 궤도 슬래브에서는 침묵으로 인해 단면적의 변화가

규칙적으로 발생하므로, 침목의 위치에 따라 균열의 발생 위치가 유도된다. 즉, 식(2)에 제시된 최대 균열 간격( $S_{r, max}$ )으로 균열이 발생하지 않고 침목의 순 간격에 따라 균열이 유도되어 침목 순 간격이 실제 균열 간격이 된다. 특히, 침목의 간격이 식(2)로부터 계산된 최대 균열 간격의 1/1.8배인 평균 균열 간격( $S_{r, avg}$ )보다 작을 경우 침목 사이에서 새로운 균열 발생이 억제되므로, 침목의 간격을 실제 발생 가능한 균열 간격으로 간주하여 균열폭 계산에 적용할 수 있다.

## 2.3 균열폭

균열 발생 이후 균열면에서 콘크리트에 발생한 응력 및 변형률은 0이지만 콘크리트와 철근의 부착으로 인해 균열과 균열 사이에서의 콘크리트에 인장 응력이 존재하게 된다. 이를 인장강화(tension stiffening) 효과라 부르며, 인장강화효과로 인해 실제 균열을 직접적으로 유발하는 변형률( $\epsilon_{cr}$ )은 식(1)에서 계산된  $\epsilon_r$  보다 작게 된다. 인장강화효과에 의한 콘크리트의 기여도는 균열 시 콘크리트 인장변형률의 50%로 가정할 수 있으며, 이를 반영한 균열 유발 변형률( $\epsilon_{cr}$ )은 아래 식(3)과 같다.

$$\epsilon_{cr} = \epsilon_r - 0.5\epsilon_{ctu} \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_{ctu}$ 는 콘크리트의 크리프 및 릴락세이션을 고려한 콘크리트 최대 인장변형률로서 단기하중에 대한 값의 1.23배를 취할 수 있다.

식(3)으로부터 계산된 균열 유발 변형률( $\epsilon_{cr}$ )과 식(2) 및 침목 순간격을 고려한 균열 간격을 으로부터 아래 식(4)와 같이 슬라이딩 궤도 슬래브에 발생하는 균열폭을 산정할 수 있다.

$$w_{cr} = S_{cr, max} \epsilon_{cr} \quad (4)$$

## 3. 슬라이딩 궤도 슬래브에서의 동절기 균열폭 산정

### 3.1 슬라이딩 궤도 슬래브 균열폭 산정 조건

본 연구에서 슬라이딩 궤도 콘크리트 슬래브에서 콘크리트의 설계압축강도는 30 MPa, 철근의 인장강도는 400 MPa이며, 콘크리트의 자기수축 및 건조수축에 의한 변형률은 최대값으로 각각  $50 \mu\epsilon$  및  $286 \mu\epsilon$ 으로 예상되었다. 콘크리트 슬래브에서의 수화열에 의한 최대 온도는 콘크리트 단위 시멘트량, 슬래브 두께 및 노출면에서 대기에 의한 냉각 효과 등을 고려하여 최대 35 °C가 발생하는 것으로 가정하였다. 구속 효과를 고려한 슬라이딩 궤도 콘크리트 슬래브에서의 동절기 균열폭 산정을 위해 고려된 기하 조건 및 하중 조건을 Table 1에 간략히 정리하였다.

**Table 1** Conditions in concrete slab on sliding slab track

Geometric condition	Sleeper net spacing	370 mm
	Rebar diameter	22.225 mm
	Reinforcement ratio	0.81 %
Loading condition	Uniformly distributed thermal stress	8.209 MPa
	Long-term temperature drop	25.0 °C

### 3.2 슬라이딩 궤도 슬래브에서의 동절기 균열폭

콘크리트 초기 재령 수화열에 의한 구속도( $R_1$ )는 1.0을 적용하고 장기 거동에 대한 구속도 ( $R_2$  및  $R_3$ )는 0.5를 적용할 경우 구속에 의해 발생하는 콘크리트 인장 변형률( $\epsilon_r$ )은 434  $\mu\epsilon$ 인 것으로 산정되었다. 한편, 콘크리트의 크리프와 팽창세이션에 의한 장기 거동 영향을 고려한 콘크리트 최대 인장 변형률( $\epsilon_{cm}$ )은 107  $\mu\epsilon$ 로 계산되며, 인장강화효과를 포함할 경우 균열 유발 변형률( $\epsilon_{cr}$ )은 381  $\mu\epsilon$ 로 계산된다.

한편, 식(2)에 의한 최대 균열 간격( $S_{r,max}$ ) 및 평균 균열 간격( $S_{r,avg}$ )은 각각 1,307 mm 및 726 mm로서, 침목 순간격보다 큰 것을 확인할 수 있다. 균열 폭 산정 시 식(2)에 의한 최대 균열 간격을 적용할 경우 균열폭이 0.5 mm로서 허용 균열폭 0.3 mm를 초과하는 것으로 나타났다. 하지만, 실제 슬라이딩 궤도 콘크리트 슬래브는 침목으로 인해 균열 발생 위치가 유도될 것으로 예상되며 이로부터 침목 순간격을 균열 간격으로 간주하여 식(4)를 적용할 경우 콘크리트 슬래브에 발생하는 균열폭은 0.14 mm인 것으로 계산되어 허용 균열폭 0.3 mm보다 작은 값으로 확인되었다. 따라서, 침목으로 인해 선균열이 유도되는 슬라이딩 궤도 콘크리트 슬래브의 특성을 고려할 경우, 슬라이딩 궤도에서의 콘크리트 슬래브는 허용 균열폭 기준을 만족할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 슬라이딩 궤도 콘크리트 슬래브에 대해 사용 중 발생할 수 있는 균열폭을 검토하였다. 균열폭 산정 시 구속으로 인한 콘크리트 슬래브에서의 인장 변형률이 가장 클 것으로 예상되는 동절기의 온도 하강 효과를 고려하였으며, 콘크리트 수화열, 자기수축 및 건조수축, 그리고 크리프 등에 의해 유발되는 구속 변형률을 함께 고려하였다. 또한, 침목에 의해 콘크리트 슬래브에서의 균열 위치가 유도되는 것을 고려하여 균열 간격을 산정하고, 이를 바탕으로 균열폭을 산정하였다.

검토 결과, 본 연구에서 검토된 콘크리트 슬래브의 배근 상황을 고려할 경우 침목 사이의 간격이 Eurocode 2에서 제시한 평균 균열 간격보다 작은 것으로 나타났으며, 균열폭 산정 시 설계 기준에서 제시된 최대 균열 간격보다 침목 사이의 간격을 균열폭 산정 시 적용하는 것이 보다 합리적인 것으로 나타났다. 이를 토대로 동절기 균열폭을 산정한 결과 0.14 mm로 예측되었으며, 이는 허용 균열폭 기준인 0.3 mm보다 작은 것으로서, 본 연구에서 검토된 슬

라이딩 궤도 콘크리트 슬래브가 사용 중 발생 가능한 균열에 대해 허용 균열폭 기준을 충분히 만족하는 것으로 확인되었다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(과제번호 15RTRP-B071566-03, 과제명: 상호작용완화를 위한 궤도 및 교량 바닥판 구조 개발)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] K.-C. Lee (2014) Application of sliding slab deck for reducing track-bridge interaction, *Proceedings of 2014 Spring Conference of the Korean Society for Railway*.
- [2] K.-C. Lee et al. (2014) Rail-structure interaction analysis of sliding slab Track, *Proceedings of 2014 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*.
- [3] British Standard (2004), Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, BS EN 1992-1-1:2004.
- [4] P B Bamforth (2007), Early-age thermal crack control in concrete, CRIA C 660, CIRIA, London.