



경부고속철도 콘크리트궤도의 초기 균열 및 손상의 유형과 제어 대책

Types of Cracks and Damage of Concrete Track at Early Stages in Kyeong-Bu High Speed Railways and Its Countermeasures

장승엽 Seung Yup Jang
한국철도기술연구원 책임연구원

1. 머리말

2010년 개통된 경부고속철도 2단계 구간(동대구 ~ 부산)에는 유지보수 최소화를 위해 콘크리트 궤도(continuously reinforced concrete track)가 부설된 바 있다. 해외에서는 이미 40년 이상 콘크리트 궤도를 운영한 경험이 있으나 우리나라에서는 터널구간에 일부 적용한 것 외에 전 구간에 걸쳐, 특히 고속철도 구간에 콘크리트 궤도를 적용한 것은 최초이다. 본 고에서는 개통 후 약 3년이 경과한 시점에서 콘크리트 궤도에 어떤 형태의 균열과 손상이 발생하고 있으며, 그 제어 대책이 무엇인지 살펴보고자 한다.

2. 경부고속철도 콘크리트 궤도의 구조와 특징

경부고속철도 1단계(서울 ~ 동대구간) 구간은 장대터널 2개소를 제외한 모든 구간이 자갈궤도 구조로 시공되었다. 자갈궤도는 자갈 입자간의 접촉을 통해 하중을 전달하는 구조이므로 열차 하중이 반복적으로 작용하면 자갈 입자의 재배열, 마모, 파괴 등으로 계속 궤도 선형의 오차가 발생하게 되고, 이로 인해 주기적인 선형 보수가 필요하게 된다. 또한 장대레일의 온도가 증가하면 궤도의 좌굴 위험이 항상 존재하기 때문에 궤도 관리에 상당한 주의를 요한다. 따라서 열차속도, 밀도, 하중 등이 증가할수록 유지관리비가 많이 들 수밖에 없기 때문에 고속철도에서는 유지보수비를 최소화할 수 있는 보다 견고한 궤도구조가 필요하다는 판단에 따라 경부고속철도 2단계(동대구 ~ 부산간) 구간은 콘크리트 궤도를 적용하게 되었다.

경부고속철도에 부설된 콘크리트 궤도는 독일에서 개발된 Rheda2000 공법¹⁾을 계승한 KCT-II 공법이다²⁾(그림 1). 이 공법은 PC 침목위에(그림 2) 레일을 설치하고 선형을 모두 조정한 후에 콘크리트를 타설하여 PC 침목이 현장치기 콘크리트에 매립되도록 하는 구조이다. 토공구간과 터널구간에는 현장타설 방식의 연속 철근 콘크리트 궤도(continuously reinforced concrete track) 형식으로 설치되어 있고, 교량구간에는 불연속 콘크리트 궤도 형식으로 설치되어 있다.

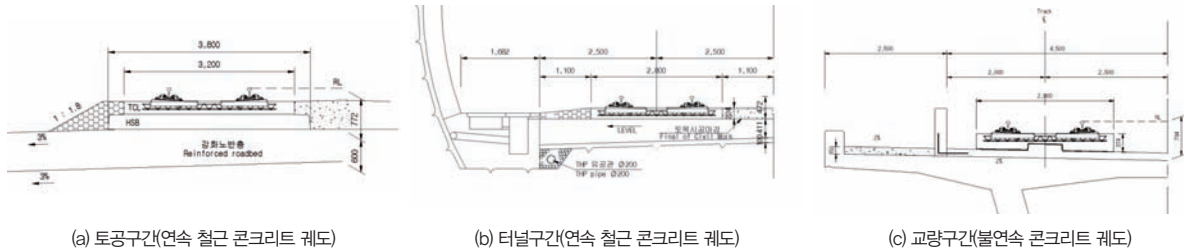


그림 1. KCT-II 궤도 구조(경부고속철도 적용 궤도)

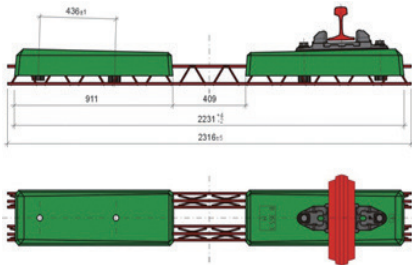


그림 2. KCT-II 침목 형상

연속 철근 콘크리트 궤도에서는 콘크리트 도상 즉, 궤도 슬래브(track concrete layer, TCL)는 조인트가 없이 선로 방향으로 연속인 콘크리트 슬래브이고, 궤도 슬래브 하부에는 무근 콘크리트 기층(도상안정층)인 HSB(hydraulically stabilized base course)가 설치된다(그림 1-(a)). 슬래브 단부와 바닥이 슬래브 신축 작용을 완전히 구속하므로 콘크리트 수축이나 온도변화에 의한 슬래브가 수축할 경우 콘크리트에는 인장응력이 발생하게 되고, 이 인장응력은 필연적으로 콘크리트 균열을 유발한다. 다만 균열이 발생하더라도 요구되는 장기 성능을 확보하기 위해 균열폭이 커지는 것을 막고 작은 균열이 촘촘하게 발생하도록 제어하기 위해 슬래브 중심 위치에 충분한 양의 철근을 배근하고 있다. 독일 Feste Fahrbahn 요구조건 목록³⁾에서는 콘크리트 침목을 사용하는 콘크리트 궤도에서는 자유로운 균열의 발생을 허용하며, 균열폭 제어를 위한 철근량을 토공구간의 경우 콘크리트 슬래브 단면적의 0.8~0.9%, 터널구간에서는 0.4%로 제시하고 있다.

무근 콘크리트로 이루어지는 콘크리트 기층(HSB)도 선로 방향의 연속인 구조이므로 필연적으로 균열이 발생하게 된다. 기층에는 철근을 설치하지 않기 때문에 수축줄눈(균열유도줄눈 또는 커터줄눈)을 약 5m 간격으로 두어 균열 간격과 균열폭을 제어한다.

교량구간에서는 교량 단부의 꺾임과 같은 변형에 때문에 토공구간과는 슬래브를 연속해서 연결할 수 없으므로 6~8m 길이의 불연속 철근 슬래브로 설계하는 동시에 수평방향의 힘을 교량의 하부구조로 전달하도록 전단키를 슬래브 하부에 설치한다(그림 1-(b)). 그리고 전단키가 슬래브의 건조수축이나 온도변화에 의한 수축을 구속하지 않도록 슬래브 하부에는 분리막을 설치하여 마찰을 줄이고, 전단키의 측면에는 탄성패드를 부착한다. 따라서 교량구간에서 궤도 슬래브는 토공구간에 비해 자유롭게 신축이 이루어지기 때문에 구속으로 인해 발생하는 응력이 매우 작아진다. 교량구간의 궤도 슬래브도 설계기준강도가 30 MPa인 콘크리트를 사용하며, 상하부 온도차에 의한 휨모멘트를 고려하여 상하연에 휨철근을 배근한다.

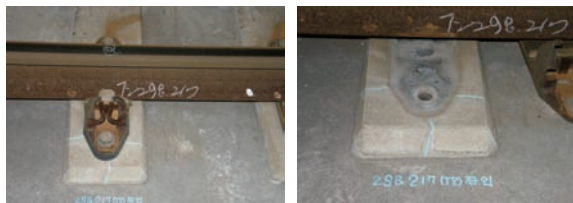
3. 초기 균열 및 손상 유형

2010년 10월 개통한 경부고속철도 2단계 구간(동대구~부산)의 콘크리트 궤도에서 발생한 초기 균열과 손상은 콘크리트 도상(궤도 슬래브, TCL) 균열, 콘크리트 기층(HSB) 균열, PC 침목 균열, 침목-도상 분리 등으로 나타나고 있다(사진 1).

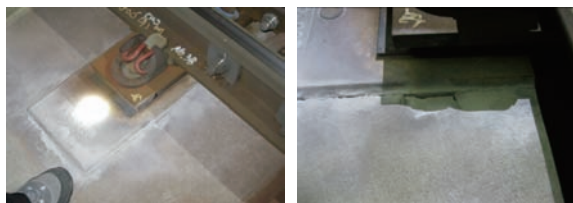
발생한 균열의 대부분을 차지하는 콘크리트 도상 균열은 PC 침목의 모서리에서부터 발달하기 시작하여 침목과 도상의 경계면을 따라 이어지는 전형적인 횡균열(transverse crack)의 형태를 보이고 있다. PC 침목의 균열은 침목 모서리부에서 볼트 구멍을 중심으로 방사형으로 균열이 발생하고 있다. 균열폭은 0.3mm 미만이고, 발생 빈도는 도상 균열에 비해 매우 낮다(표 1). 침목-도상 분리 구간은 침목 주변부 백태가 발생하고, 심한 경우 침목 및 도상 파손으로



(a) 콘크리트 도상(궤도 슬래브)와 기층의 균열



(b) PC 침목 균열



(c) 침목-도상 분리부에서의 백태, 균열, 파손

사진 1. 초기 균열 및 손상의 형태

진행되는 형태를 보이고 있다. 발생 빈도는 도상 균열이나 침목 균열보다 더 낮았다.

4. 원인과 대책

앞서 서술한 초기 균열과 손상 유형 중에서 도상 슬래브의 균열과 콘크리트 기층의 균열은 그 구조적 특성에 따라 콘크리트 자체의 수축과 슬래브-기층 간 온도차에 의한 응력에 의해 발생하며, 침목이 매립되어 있으므로 슬래브의 단면이 급격히 변화하는 침목-도상 경계를 따라 균열이 발달하게 된다. 교량-토공 접속부 등에서는 부등침하가 발생할 경우 콘크리트 기층에서 상당히 큰 휨 균열이 발생하기도 한다. 이 경우 부등침하에 의해 균열폭이 증가된다고 볼 수 있으나 실제 현장에서는 명확한 구분이 어려웠다. 독일에서의 경험이나 국내외 콘크리트 포장에서의 경험에 따르면, 이러한 횡균열이 발생하더라도 균열폭이 적절히 관리되고, 하부 노반이 양호한 조건이 유지된다면 장기적인 내구성에 미치는 영향은 매우 낮다. 현재 설계 시 균열폭 목표는 0.5 mm이지만, 유지보수 시에는 1.0 mm 이상의 균열에 대해 에폭시 수지 주입 보수를 실시하도록 하고 있다⁵⁾.

표 1. 경부고속철도 2단계 구간의 콘크리트 궤도 균열 및 손상 현황(2013년 5월 현재)⁴⁾

(a) 도상 균열

구분		단위	계	토공	교량	터널
구조물 연장		km	126k459	31k070	22k137	73k252
균열 수	계	개소	39,965	18,489	1,722	19,754
	폭 0.3 mm 미만	개소	29,832	15,823	1,545	12,464
	폭 0.3 ~ 0.5 mm 미만	개소	9,030	2,314	140	6,576
	폭 0.5 ~ 1.0 mm	개소	1,103	352	37	714

(b) 침목 균열

구분		단위	계	토공	교량	터널
구조물 연장		km	126k459	31k070	22k137	73k252
균열 수	계	개소	3,962	3,556	385	21
	폭 0.3 mm 미만	개소	3,962	3,556	379	21
	폭 0.3 ~ 0.5 mm 미만	개소	5	-	5	-
	폭 0.5 ~ 1.0 mm	개소	1	-	1	-

(c) 침목-도상 분리

구분		단위	계	토공	교량	터널
침목-도상 분리 구간(최우 침목 각각 산정)		개소	345	345	-	-

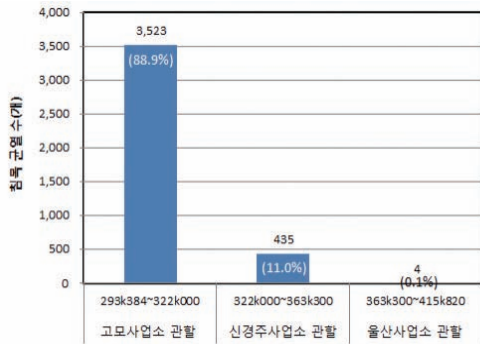


그림 3. 구역별 침목 균열 분포⁴⁾

PC 침목에는 레일체결장치의 볼트가 고정되어 있어 레일의 선형을 유지하는 가장 중요한 기능을 담당하고 있다. 따라서 PC 침목의 균열이 레일체결장치의 볼트 매립부에 발생하게 되면 인발 및 전단강도가 낮아질 수 있기 때문에 궤도 슬래브의 균열이 PC 침목으로 연결되거나 PC 침목 자체에 균열이 발생하는 것은 엄격히 제한하고 있다. 현장에서 발생한 PC 침목의 균열은 볼트 구멍을 중심으로 방사형으로 발생하고 있지만 체결장치를 제거한 후의 균열 발달 상태를 보면 볼트에서부터 균열이 시작된 것이 아니라 침목의 외측 모서리에서부터 발달하여 외기에 노출된 부분까지만 균열이 발생하고 있음을 알 수 있다<사진 1-(b)>. 따라서 이 균열은 열차 하중에 의해 볼트로 전달되는 힘에 의해 발생한 것이 아니라 콘크리트의 수축 현상에 기인한 것이라고 판단된다. <그림 3>은 경부고속철도 2단계 구간의 사업소별 침목 균열 발생



사진 2. 침목-도상 경계면의 간극

현황을 나타낸 것이다. 특정 구역(고모사업소 관할 구역)에서 대부분의 침목 균열이 집중되어 있음을 알 수 있다. 이 구역은 사업 초기에 공급된 침목이 부설된 구역이다. 따라서 초기 콘크리트 침목 제조 시 양생이나 배합 등의 원인으로 건조수축 변형률이 크게 발생했을 가능성이 크므로 PC 침목 균열을 줄이기 위해서는 제조 시 콘크리트의 품질 관리가 무엇보다 중요할 것으로 판단된다.

침목-도상 분리의 경우는 침목 주변의 콘크리트 표면에서 백화(efflorescence)가 발견되는 점으로 볼 때, 침목 하부로 유입된 침투수가 열차 주행 시 펌핑(pumping) 현상에 의해 밖으로 흘러나오면서 이것이 슬래브 표면에서 석출되는 것으로 추정된다. 즉, 침목 하부에는 침목의 상대적 인 수직 처짐이 발생할 만큼의 간극(void)이 존재할 가능성이 크다. 현장에서 코어를 채취하여 내부를 확인한 결과에서도 <사진 2>와 같이 육안으로 간극을 확인할 수 있었다. PC 침목 하부로 현장치기 콘크리트를 채워 넣는 시공방법의 특성상 이러한 간극은 시공 중에 발생할 가능성이 높다. 따라서 시공 숙련도를 향상하는 것이 간극을 줄이는데 가장 유효한 대책이라고 판단된다. 콘크리트 침목은 래티스 철근으로 TCL과 연결되어 있기 때문에 간극이 발생하더라도 상대변위의 크기는 매우 작아 당장 열차의 운행에 영향을 주는 수준은 아니나 수분이 침투하여 장기간 노출될 경우 철근 부식이 발생할 수도 있고, 열차 하중이 반복적으로 작용하게 되면 변위가 점차 증가하고 침목 주변의 도상 슬래브나 침목 콘크리트의 박락으로 발전할 수 있으므로 주입 보수를 실시하는 것이 바람직하다<그림 4>.

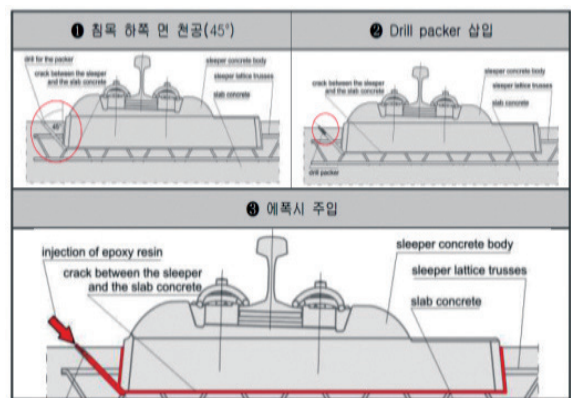



그림 4. 침목-도상 분리 보수 방법⁴⁾

5. 맺음말

이상과 같이 본 고에서는 경부고속철도 콘크리트 궤도에서 초기에 발생하는 대표적인 균열과 손상의 유형을 제시하고 원인과 제어 대책을 살펴보았다. 아직 우리나라는 콘크리트 궤도의 운영 경험이 충분하지 못하여 초기 균열과 손상에 대해 지나치게 우려하는 부분이 없지 않다. 그러나 가장 빈번하게 발생하는 궤도 슬래브의 횡균열은 콘크리트 특성상 필연적으로 발생할 수밖에 없기 때문에 너무 성급하게 보수를 실시하기 보다는 장기 내구성에 미치는 영향을 살피고 지속적으로 관리하는 것이 중요하다. 그리고 PC 침목 균열이나 침목-도상 경계부의 간극 등은 침목의 제조와 시공 시의 품질 관리, 숙련도의 향상 등이 가장 중요한 요인이 될 수 있다. 앞으로 장기적인 균열이나 손상의 진전을 관찰하고 많은 경험과 데이터를 축적해 나간다면 보다 경제적인 궤도 운영을 위한 토대를 구축해 나갈 수 있을 것으로 기대한다. 

참고문헌

1. 장승엽, 강윤석, 김은, 고속철도 콘크리트 슬래브 궤도의 최신 기술, 한국콘크리트학회지, Vol. 16, No. 4, 2004, pp. 10 ~ 17.
2. 경부고속철도 2단계 구간 궤도공사 실시설계보고서, (주) KRTC, 한국철도시설공단, 2006.
3. DB, Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn (Requirements catalog for the construction of slab track), 4th ed., Deutsche Bahn(DB), 2002.
4. 박선규 외, 콘크리트 궤도 균열 합동조사 결과보고서, 한국철도시설공단, 2013. 6.
5. 선로유지관리지침, 한국철도시설공단, 2012. 12.



장승엽 박사는 2003년 서울대학교 토목공학과에서 콘크리트 내구수명 예측에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 2003년부터 현재까지 한국철도기술연구원에서 콘크리트 슬래브궤도를 비롯한 신형식 궤도 관련 연구를 수행해 오고 있다.

syjang@krri.re.kr

담당 편집위원 : 진남희((재)한국건설품질연구원) nhjin70@hanmail.net

도서 소개

2012 개정 콘크리트구조기준 예제집

- 저 자 : 한국콘크리트학회
- 출판사 : 기문당
- 발행일/Page : 2012-12-20/560(판형 A4변형)
- 정가(비회원가) : 40,000원
- 회원할인가 : **32,000원** 배송비 착불(3,000원)

도서 소개

콘크리트구조물의 설계는 재료역학과 구조역학의 기본 이론에 콘크리트재료의 역학적 성질을 반영하여 공학적 판단을 접목시켜야 비로소 완성된다. 이러한 개념에 근거하여 설계이론이 도출되는 과정을 충분하고 완전히 이해한다는 것은 구조설계를 책임지는 기술자들에게는 매우 중요한 일이다. 이번에 새로 발간하는 예제집은 기존의 예제들을 수정하여, 새로 개정된 콘크리트구조기준(2012)의 내용을 반영하였다. 또한 기존 예제집에서는 누락되었던 많은 부분을 추가하여 콘크리트구조기준의 내용 전체가 예제에 포함될 수 있도록 노력하였다. 새로 추가된 내용에는 지중구조물의 설계하중, 노출등급에 따른 내구성 허용기준, 고강도 철근의 설계 적용, 비틀림 설계, 뿔림전단 설계, 확대머리 정착, 경량콘크리트 정착, 단주 설계, 프리스트레스트 콘크리트 휨설계, 벽체 설계, 캔틸레버 확대기초 설계, 아치 설계, 라멘 설계, 합성구조 설계, 콘크리트용 앵커 강도, 기존 구조물의 안전성 평가 등이 포함되었다.

