

# GFRP로 보강된 프리캐스트 슬래브 궤도 개발 및 거동분석

## Development of Precast Slab Track Reinforced with GFRP and Analysis of Behavior

지광습†  
Goangseup Zi

이승정\*  
Seung-Jung Lee

문도영\*\*  
Do Young Moon

김유봉\*\*\*  
Yoo-Bong Kim

백인혁\*\*\*\*  
In-Hyuk Baek

### ABSTRACT

철도 시스템에서 철도궤도와 레일은 주요한 신호 시스템의 일부로 사용되고 있으나 콘크리트 슬래브 궤도 내부의 철근으로 인한 신호전류 감소, 교란 등을 방지하기 위해 과도한 절연작업이 필요하다. 본 연구에서는 국내에서 개발된 프리캐스트 슬래브 궤도의 횡방향 철근을 GFRP 보강근으로 대체하여 절연작업의 감소를 가능하게 하였다. GFRP로 보강된 프리캐스트 슬래브 궤도의 설계과정과 정적 휨 시험과 단부의 연결철근 인발 시험을 통한 거동 분석 및 고찰 내용을 제시하였다. 휨 시험과 실스케일 인발 시험의 결과 정적 휨 강도는 정립된 설계법에 의해 적절한 강도를 가지고 있으나 개발된 연결철근의 위치와 형태는 온도 또는 수축으로 인해 발생할 수 있는 축력을 저항할 수 없음을 확인하였다.

### 1. 서론

콘크리트 슬래브 궤도는 자갈도상 궤도에 비해 고품질, 고강도의 콘크리트 시공이 가능하며 기계화 시공으로 시공속도가 빠르며 유지관리 측면에서 장점이 있기 때문에 현재 전세계적으로 여러 형태의 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도가 연구 및 개발되고 있다. 특히, 국내에서는 2006년 삼표이앤씨(주)와 한국철도기술연구원이 일차적으로 개발한 PST 시스템이 개발되어 시험부설 및 성능검증을 마친 상태에 있다.

이러한 콘크리트 슬래브 궤도의 경우 레일과 궤도가 신호시스템의 일부로 사용되기 때문에 슬래브 궤도 내에 존재하는 철근 보강재에 의한 신호교란이 우려된다. 따라서 이의 방지를 위해 모든 철근의 접합점에 절연재를 시공하여야 한다는 규정을 지켜야 한다. 이는 슬래브 궤도의 원가 상승의 요인 중 하나이다.

본 연구에서는 삼표이앤씨(주)와 한국철도기술연구원에 의해 개발된 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도의 절연성능을 높이기 위해 횡방향 철근을 GFRP로 대체한 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도를 개발하였다. 설계 기준의 경우 독일에서 도입된 설계법을 국내 설계기준에 적합하도록 본 논문의 저자들이 재정립한 설계법을 이용하였다. 설계된 슬래브 궤도의 정적 거동을 실험적으로 검증 및 분석하였다.

† 책임저자 : 정회원  
E-mail : g-zi@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-3324 FAX : (02)928-7656  
\* 비회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부  
\*\* 정회원, 경성대학교 토목공학과  
\*\*\* 정회원, 삼표이앤씨(주). PSTS팀.  
\*\*\*\* 정회원, 삼표이앤씨(주). PSTS팀.

## 2. 프리캐스트 슬래브 궤도

기 개발된 프리캐스트 슬래브 궤도는 그림 1과 같은 표준단면을 가지고 있다. 공장에서 미리 제작된 프리캐스트 콘크리트 슬래브 패널과 도상강화층(Hydraulic Sub Base), 그리고 두 층의 사이에서 슬래브 패널을 지지하며 하중을 하부로 고르게 전달하는 역할을 하는 충전재를 기본구성으로 한다. 본 연구에서는 콘크리트 슬래브 패널만을 대상으로 하여 설계 및 검증 시험을 수행하였다. 그림 2는 국내에서 개발된 PST 시스템의 상세도이다.

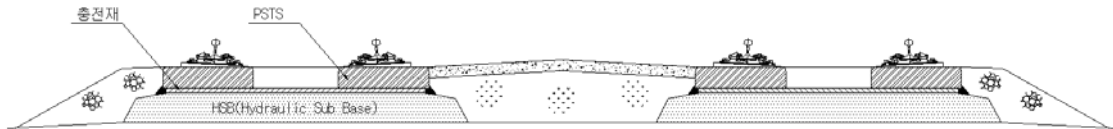


그림1. 프리캐스트 슬래브 궤도 표준단면

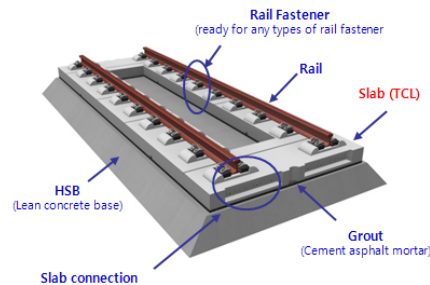


그림2. 국내에서 개발된 프리캐스트 슬래브 궤도

## 3. GFRP 보강근

GFRP 보강근의 인장특성을 측정하기 위하여 ACI 위원회에서 제시하고 있는 규정에 의하여 인장시험을 수행하였다. ACI 440 위원회에서는 시편 GFRP 보강근의 길이는 직경의 40배 이상으로 규정하고 있으며 최소 길이 역시 100mm 이상으로 규정하고 있다. 또한 최소 정착 길이는 250mm 이상으로 규정하였다. 실험의 결과로 측정된 보장 인장 강도(Guaranteed tensile strength)는 1059MPa이었으며 사용 환경에 대한 인자를 곱해주면(외기에 노출된 콘크리트에 GFRP가 사용될 경우 0.7) 설계 인장 강도(Design tensile strength) 741.3MPa을 얻을 수 있다. 측정된 탄성계수(Specified tensile modulus)는 46.5GPa이다.

## 4. 프리캐스트 슬래브 궤도의 설계

프리캐스트 슬래브 궤도의 기본설계는 Eisenmann이 제안한 설계개념을 기본으로 하며 적용기준은 Beton Kalender 2000으로 한다[4,5]. 이러한 독일의 기본 설계법을 국내 설계기준에 적합하도록 고려 대학교에서 2010년에 설계법을 재정립한 바 있다[2,3].

프리캐스트 슬래브 패널의 설계 조건은 다음과 같다. 먼저, 설계 하중을 산출해야 하며, 이러한 설계 하중에 저항할 수 있도록 강도를 산출해야 한다. 검토 조건으로는 슬래브 패널에 발생한 응력, 콘크리트의 피로 강도가 있다. 설계 하중의 경우 차륜하중, 온도하중, 시·계동하중을 포함한 수평하중이 있다. 차륜 하중은 설계 대상 철도에 따라 다르며 고속철도의 경우 UIC 71 하중 모델을 사용한다[3]. 이러한 하중 모델은 레일과 체결장치에 의해 슬래브 궤도 본체에 분산되어 작용하도록 한다. 이로 인해 발생하는 응력은 차륜의 이동에 따른 검토를 수행하여야 하며 불균일한 궤도를 운행하는 경우 차륜과 레일간의

요철로 인해 발생할 수 있는 동적효과는 실측자료를 고려한 동적충격계수를 발생응력에 곱하여 설계에 사용한다.

상대적으로 짧은 주기에서 작용하는 차륜 하중에 의한 응력을 피로응력이라 하며, 차륜 하중과 온도에 의해 발생된 인장응력의 최대값을 최대인장응력이라고 한다. 이 경우 슬래브 패널의 강도 검토는 최대인장응력이 콘크리트의 인장강도를 넘지 않아야하며 피로응력이 콘크리트의 피로강도를 넘지 않아야 한다.

설계 응력의 경우 대부분 Westergaard의 해를 기반으로한 간이 계산법을 사용하고 있다. 하지만 이 경우에는 탄성지지 판 이론에 준한 단일하중 하에서의 모멘트 영향선을 실제 설계에 사용하기 위해 보 간법을 이용한 식으로 대체하고 있는데 이러한 설계 식이 원거리의 영향을 적절히 모사하지 못한다. 따라서 탄성길이 이상은 적용이 불가능하다. 또한 본 대상 구조물은 중공부로 인하여 폭과 길이 모두가 넓은 판보다는 일방향 슬래브 또는 빔과 같이 거동하게 된다. 따라서 슬래브 패널의 설계 시 이러한 간이 설계법을 사용하는데 문제가 있는 것으로 판단된다. 자세한 내용은 지광습 등(2010)을 참조할 수 있다[3]. 따라서 본 연구의 프리캐스트 슬래브 설계에서는 삼차원 유한요소해석 모델을 사용하여 설계 응력을 산정하였다.

본 연구의 대상 구조물과 같이 길이에 비해 두께가 얇은 구조물의 거동을 모사하기에 적절한 휨 거동 능력이 향상된 요소인 C3D8I를 사용하였으며 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였다. 각 체결구에 분배된 차륜하중에 의한 지지점력을 하중으로 대입하였으며 설계 시의 보수적인 측면으로 슬래브층과 도상강화층 사이의 충전층에서 미끄러짐이 발생하는 경우를 고려하여 슬래브-기층 경계면에서 상대변위를 허용하도록 모델링하여 해석하여 슬래브 패널 하면의 응력을 산정하였다.

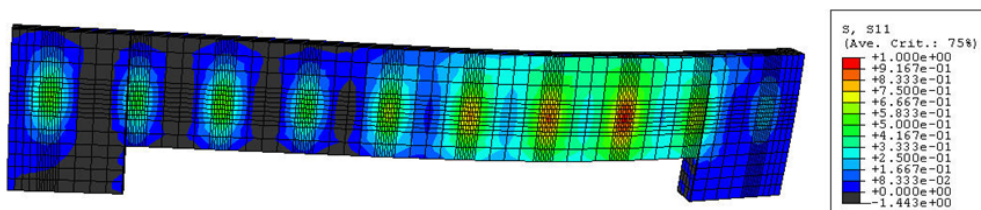


그림3. 슬래브 패널 하면의 종방향 응력도

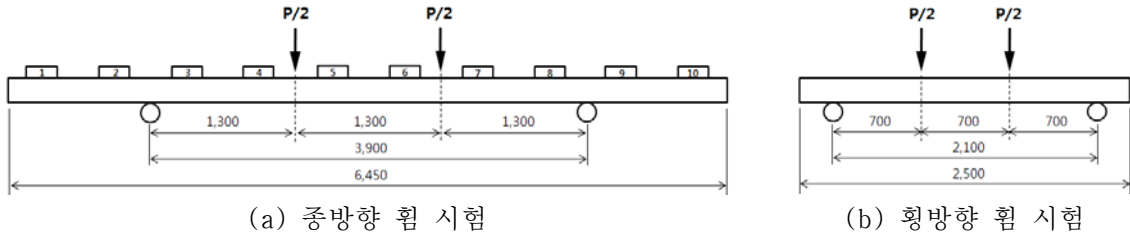
앞서 언급한 것과 같이 고속철도 콘크리트 궤도구조에 존재하는 철근이 궤도회로에서 신호전류의 간섭문제를 발생시킨다는 연구결과가 발표된 바 있으며 여러 연구자들에 의해 실내 실험 및 현장 실험이 수행되어왔다[1]. 이러한 문제의 대책으로써 철근을 전기적으로 절연시켜 전기적인 루프를 제거하는 방안이 주로 사용되고 있다. 또한 고속철도 공사시방서에 전기절연 저항성능확보를 위해 절연 간격재를 이용하여 철근을 서로 결속할 것으로 규정하고 있기 때문에 모든 철근의 교차점에는 플라스틱 절연재, 고무 호스 등을 이용하여 시공하고 있다. 이러한 작업들은 개소가 매우 많고 작업이 어려워 인건비가 매우 많이 들며 시공비 증가의 직접적인 원인이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 절연작업을 근본적으로 감소시킬 수 있는 유리섬유보강근, Glass Fiber Reinforced Plastics(GFRP)로 횡방향 철근을 대체하여 절연성을 확보하였다. 본 논문에서는 GFRP 보강근을 사용한 슬래브 궤도의 정적 거동에 대하여 고찰하였으며 본 저자들의 다른 논문에서 절연성능에 대해 검증한 결과를 발표하였다.

## 5. 휨 시험 및 연결철근 인발시험

슬래브 궤도의 거동을 실험적으로 고찰하기 위해 휨 시험과 실스케일 인발 시험을 수행하였다. 파괴 하중, 파괴형상, 하중-변위 곡선을 분석하여 종방향 및 횡방향 슬래브 궤도의 기본적인 휨 성능을 검증하였다. 또한 슬래브 궤도에 축력으로 가해지는 온도 및 수축하중에 의한 슬래브 궤도의 거동을 확인하

기 위해 두 개의 슬래브 케도를 연결하고 있는 연결철근의 위치 및 형태에 따른 거동을 실스케일 인발 시험을 통하여 분석하였다.

휨 시험의 경우 1,000kN 용량의 UTM을 이용하여 2mm/min 속도의 변위제어 방법으로 수행되었으며 그림 4와 같이 하중을 재하하고 변위계는 시편의 상면에 설치하여 상부의 처짐을 측정하였다.

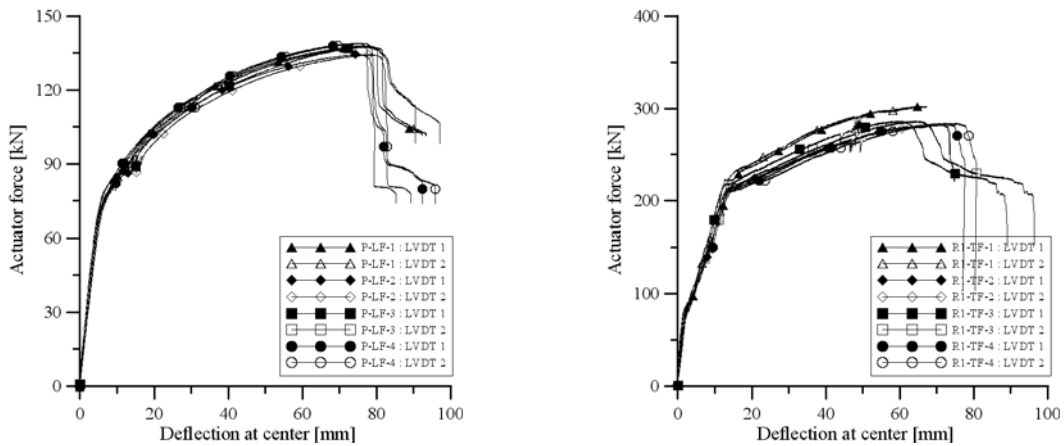


(a) 종방향 휨 시험

(b) 횡방향 휨 시험

그림 4. 슬래브 케도 휨 시험 세팅

슬래브 케도의 종방향 휨 시험의 경우 약 10mm 처짐에서 균열발생 및 변형경화가 시작되었으며 공칭 휨강도 59.56kN·m의 약 1.5배인 89.11kN·m의 휨 강도를 가졌으며 약 74mm 처짐에서 최종 파괴를 확인하였다. 횡방향의 경우 약 15mm 처짐에서 초기 균열이 발생하였으며 약 20mm 처짐에서 변형경화가 시작되었다. 설계 휨 강도 69.72kN·m의 약 1.44배인 101.03kN·m의 휨 강도를 가졌으며 약 67mm 처짐에서 최종 파괴를 확인하였다. 휨 시험의 결과를 그림 5에 도시하였다.



(a) 종방향 휨시험

(b) 횡방향 휨시험

그림 5. 슬래브 케도 휨 시험 결과

기 개발된 PST 시스템의 연결철근의 경우 슬래브 케도 단부의 중앙부에 헤드바 형태의 연결철근이 2개 존재하였다. 기존의 연결철근의 경우 단부 중앙부의 연결철근 주위의 콘크리트가 파쇄되었으며 설계 시 계산된 온도하중과 체결력인 약 800kN을 저항할 수 없음을 확인하였다. 따라서 단부 측면에 일반 철근형태의 변경된 연결철근을 매설한 경우 온도하중과 체결력을 충분히 저항할 수 있었으며 콘크리트의 파쇄 등의 파괴형상은 나타나지 않았다. 인발 시험의 결과를 그림 6에 도시하였다.

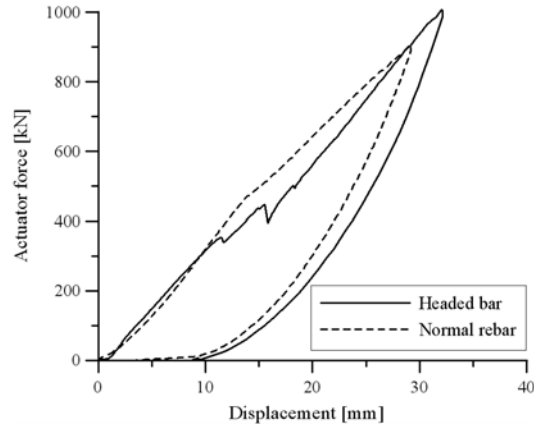


그림6. 슬래브 궤도 인발 시험 결과

## 5. 결론

본 연구에서는 기 개발된 프리캐스트 슬래브 궤도의 절연성능을 높이기 위해 횡방향 철근을 유리섬유 보강근 GFRP로 대체하여 개발하고 이의 정적 성능을 검증하였다. 현재 독일에서 도입된 탄성지지 판 이론에 준한 단일하중 하에서의 모멘트 영향선을 보간한 설계법이 본 연구의 대상인 중공형 슬래브 궤도를 적절히 고려할 수 없기 때문에 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 삼차원 유한요소해석을 수행하여 응력을 산출하였다. 설계된 결과를 검증하기 위해 슬래브 궤도의 종방향 및 횡방향 휨 실험을 수행하였으며 정적 하중 재하 시 설계된 슬래브 궤도가 하중을 적절히 저항할 수 있음을 확인하였다. 또한 실스케일 연결철근 인발실험을 통해 기 개발된 형태의 연결철근의 경우 온도하중과 체결력 등으로 야기될 수 있는 축력을 저항할 수 없기 때문에 단부 측면에 일반 철근 형태의 연결철근의 설치가 타당한 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

본 연구는 2009년 정인옥학술장학재단의 지원사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 정인옥학술장학재단에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 박대근, 김정훈, 김재학, 강영중, “궤도구조 및 재료가 궤도회로에 미치는 영향 분석”, 2008년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.1711-1715. 2008.
2. 이승정, 지광습, 장승엽, 김유봉, “프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도의 개발 및 설계”, 2010년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2010
3. 지광습, 이승정, 장승엽, “한국형 프리캐스트 슬래브 궤도 설계”, 2010년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.1423-1429. 2010.
4. Eisenmann, J. “Introduction : Ballasted tracks and the goals of slab track development”, RTR special, 2006.
5. Eisenmann, J., Leykauf, G. “Beton-fahrbahnen, 2nd ed.”, Ernst & Sohn, Berlin, 2001.