

## 급속경화궤도 표준단면에서 정적 응력 발생 특성연구

## A study for the characteristic of static stress on the standard cross-section of rapid-hardening track

민경찬\*<sup>†</sup>, 이일화\*, 이종섭\*\*Kyung Chan Min\*<sup>†</sup>, Il Wha Lee\*, Jong Sub Lee\*\*

**Abstract** The low-maintenance of existing line is a growing recognition for the maintenance cost savings. The purpose of rapid-hardening track is reducing the maintenance as a method for the ballast to the concrete track and does not interfere with train operation. However, the rapid-hardening tracks have the characteristic that did not used steel reinforcement, composed of one layer and immersed large sleeper and construction joint. In this paper, Analysis performed using the 3D finite element analysis in order to examine the characteristic of the maximum tensile stress and shear stress on the rapid-hardening track of standard cross-section.

**Keywords** : Rapid-hardening track, static load, tensile stress, shear stress

**초 록** 운행선의 생력화는 유지보수 절감면에서 중요한 요소로 인식되고 있다. 급속경화궤도는 일반 도상자갈을 콘크리트 슬래브화 시키는 공법으로서 열차운행에 지장을 주지 않으면서 궤도구조를 개선하여 기존선의 유지보수 업무를 획기적으로 줄이는데 목적이 있다. 하지만 기존의 콘크리트궤도와는 달리 철근이 사용이 되지 않고 단일층으로 구성되었으며 대형 침목 매립과 시공이음매가 존재하는 특성이 있다. 본 논문에서는 급속경화궤도 표준단면에서 발생하는 응력특성을 검토하기 위하여 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 주요 내용은 정적 응력에 의해 발생하는 급속경화궤도의 위치별 인장응력 및 전단응력의 크기와 최대응력의 특성을 검토하였다. 해석결과는 충전층에서 발생하는 최대인장응력(S33) 및 최대전단응력 (S23)은 각 각 1.01MPa, 1.02MPa 로 나타났다.

**주요어** : 급속경화궤도, 정적하중, 인장응력, 전단응력

## 1. 서 론

포장궤도는 운행 중인 기존선의 생력화를 목표로 하며 최소 열차차단시간 내에 일정작업이 수행되며, 기본적으로 콘크리트궤도 수준의 유지관리성을 목표로 하고 있다. 이를 만족하기 위해서는 궤도구성품을 비롯한 충전재료와 충전재의 두께, 침목의 폭과 간격과 경제성 및 시공성에 대한 최적구조의 개발과, 현장 적용 시 충분한 내구성과 안정성을 확보하여야 한다. 본 논문에서는 제안된 포장궤도구조에 대한 내구성 평가를 위하여 시멘트 모르타르 충전형 포장궤도를 대상으로 설계하중, 현장조건등을 고려하여 3차원 유한요소해석 방법으

† 교신저자: 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단([theswear@krrri.re.kr](mailto:theswear@krrri.re.kr))

\* 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단 책임연구원

\*\* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 부교수

로 충전층 두께의 변화를 주어 구조변화에 따른 인장응력 및 전단응력, 변위를 표준단면에 대한 안정성을 검토하였다.

## 2. 단면설계를 위한 유한요소 해석

### 2.1 해석 모델

Fig 1은 급속경화궤도를 실제 거동과 유사하게 평가하기 위하여 충전층 및 노반층의 설계단면을 구성하였다. 포장궤도(레일, 체결구, 침목)를 포함하여 상부로부터 모르타르가 주입되는 충전층(Poured layer), 기존도상과 세립분이 혼합되어있는 도상층(ballast), 강화노반층(Reinforced Roadbed) 그리고 원지반인 노반층(Roadbed)으로 구성하였으며 노반과 충전층 및 침목은 연속체로 가정하였다. 본 해석의 데이터 분석위치는 인장응력이 최대로 발생하는 충전층 중앙의 최하단부에서 측정하였다.

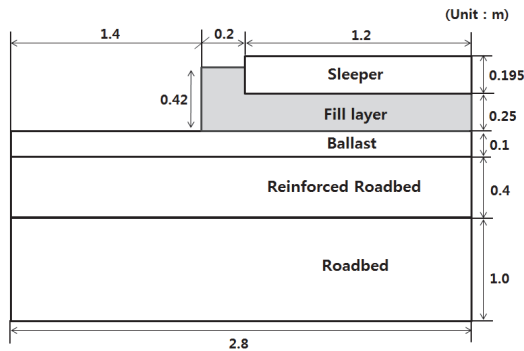


Fig 1. Standard cross section

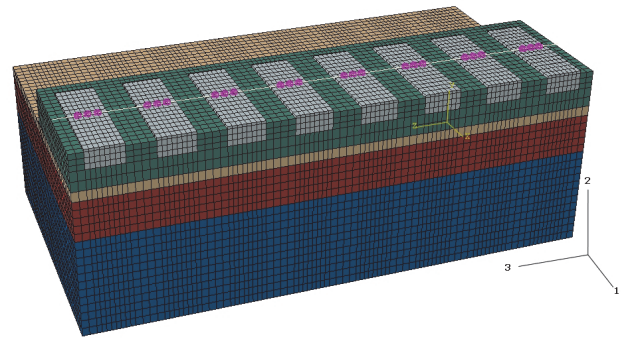


Fig 2. Modeling for FEM

Fig 2는 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 시멘트 모르타르 충전형 포장궤도를 대상으로 Fig 1과 같은 설계단면을 3차원 모델링하여 나타내었다. 충전층과 노반층 및 침목의 각 층은 연속체로 가정하고, 층간에서 미끄러지지 않는 것을 고려하여 모델링 하였으며, 레일과 침목사이의 인터페이스를 고려하는 스프링 패드로 모델을 구성하였으며 침목은 대형침목(2,400×360×195mm)을 사용하였다. 접촉 요소로는 레일과 침목사이의 고무패드를 스프링으로 표현하였으며 레일은 UIC 60kg/m의 빔요소를 적용하였으며 패드는 수직방향으로 상대변위가 발생하지 않을 정도의 정적계수 25kN/mm을 적용하였다. 해석모델은 선형탄성해석으로서 해석시간을 줄이기 위하여 충전형 모르타르 포장궤도의 한 스팬의 길이를 좌우 대칭성(Symmetric analysis)으로 전체 25m을 사각형 요소 1/4로 분할하고 5m로 적용하였으며, 실제 하중분포를 파악하기 위하여 8개의 침목을 배치하였다. Table 1의 기본 물성치를 바탕으로 급속경화궤도의 충전층 설계변수에 대한 특성을 평가하였으며 기존 문헌조사에 의한 값으로 궤도구조 해석을 위한 연구에서 입력 물성으로 사용되었다. 해석모델의 방향별 응력에 대하여 해석을 수행하였다. 방향별 응력은 레일횡방향 인장응력(S11), 하중재하방향 압축응력(S22), 레일방향 인장응력(S33), 레일횡방향과 하중재하방향의 전단응력(S12), 레일횡방향과 레일방향의 전단응력(S13), 하중재하방향과 레일방향의 전단응력(S23)으로 구분하여 각 각의

응력특성을 검토하였다.

**Table 1.** Material Property

Classification	Dimension	Density(t/m <sup>3</sup> )	E(MPa)	Poisson's ratio( $\nu$ )
Rail	60kg/m	-	210,000	0.3
Rail pad	25kN/mm	-	-	-
Sleeper	2,400×360×195(H)	2.3	36,770	0.167
Poured layer	30MPa	2.3	31,940	0.2
Ballast	-	1.7	100	0.3
Reinforced Roadbed	-	1.6	140	0.3
Roadbed	60MPa/E <sub>v2</sub>	1.8	120	0.33

## 2.2 해석 조건

본 논문에서는 급속경화궤도 기본설계 단면을 바탕으로 정적 하중에 의해 발생하는 급속경화궤도의 위치별 인장응력 및 전단응력의 특성에 대하여 검토를 수행하였다. 해석조건은 충전층 두께를 150, 200, 250, 300, 350(mm)로 변화시켜 두께별 인장응력, 전단응력 및 변위에 미치는 영향을 검토하였다. 최대응력이 발생하는 지점에 대하여 검토하였다. 하중조건은 탄성해석을 위한 단위하중으로서 축하중은 차량의 중량을 축수로 나눈 하중이며 윤하중은 축하중의 1/2을 사용한다. 열차의 설계하중은 철도의 건설기준에 관한 규정 (국토교통부고시 제2013-236호)에 의거하여 KRL2012 표준활하중(220kN)을 적용하였으며 설계속도는 400km/h이다. 캔트부족량 및 동적충격계수는 철도설계편람(궤도편, 2010)을 참조하였으며, 설계편람에 따르면 궤도틀림 및 캔트부족 또는 캔트초과에 기인하는 윤하중을 고려한 유효하중은 아래 식 (1)을 이용하고 차륜/레일 간 요철, 레일절손 등에 기인하는 차량 탄성하 부분의 상하진동에 따른 예외적인 충격에 의한 동적하중은 식 (2)를 이용한 수직하중 산정식은 다음과 같다.

$$Q_{\text{eff}} = Q \times 1.2 \quad (1)$$

$$Q_{\text{dyn}} = Q_{\text{eff}} \times \text{DAF} \quad (2)$$

$$\text{DAF} = 1 + t \cdot \Phi(1 + 0.5(V - 60/190)) \quad (3)$$

따라서, 본 논문에서 설계속도는 현 고속철도임을 고려하여 400km/h로 결정하였으며, 식 (1)과 식 (2)로부터 구한 표준동적하중(DAF) 207kN을 해석단면의 중앙지점 레일상부에 적용하였다.

## 3 해석 결과

### 3.1 충전층의 두께별 응력 및 변위특성 검토

충전층의 두께변화에 따른 응력 및 변위의 특성을 검토하였다. 충전층의 두께는 100~350mm로 매 50mm 두께로 6가지 type으로 나누어 해석을 수행하였다. 해석결과, Fig 3은

레일횡방향 인장응력(S11)과 레일방향 인장응력(S33)의 데이터 분석위치는 하중재하 직하부 충전층 최하단부에서 측정하였으며, 충전층의 두께가 두꺼워 짐에 따라서 인장응력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 레일방향으로 작용하는 인장응력(S33)의 인장응력은 최대 1.65MPa, 최소 0.72MPa로 약 43% 감소되었다. 레일횡방향 인장응력(S11)의 인장응력은 최대 1.35MPa, 최소 0.42MPa로 약 30% 감소되었다. 이는 두께가 두꺼워짐에 따라서 급속경화레도 구조의 안정성을 향상시키는 것이라 판단할 수 있다. 변위의 경우에는 급속경화레도 충전층의 두께가 증가함에 따라 변위가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 최대 변위는 0.48mm, 최소 변위는 0.27mm가 나타났으며 약 57% 감소되었다. 급속경화레도의 구조적 안정성을 비교하였을 때, 두께 250mm이상부터 허용응력에 만족하고 있으며, 충전층의 두께가 350mm일 때 가장 좋은 결과를 얻었지만 경제성을 고려하였을 때 250mm두께의 단면이 가장 효율적인 것으로 판단되어 인장응력 및 전단응력의 거리별 특성에 대하여 검토를 수행하였다.

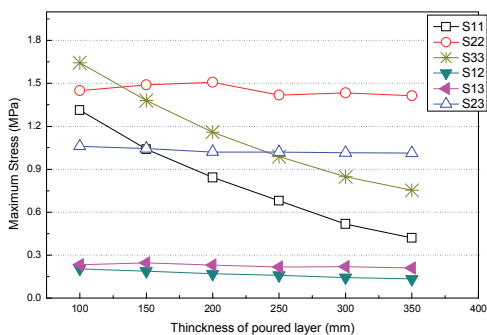


Fig 3. Maximum stress of the poured layer thickness

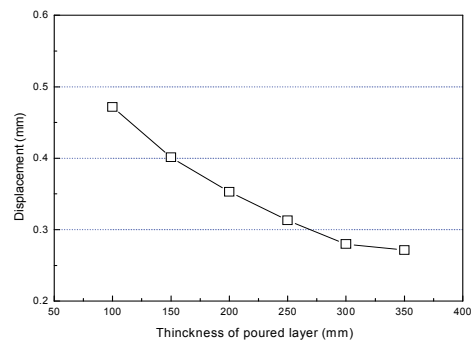


Fig 4. Displacement of the poured layer thickness

Fig 5는 침목을 제거한 충전층에서 발생하는 인장응력(S11)의 컨투어이다. Fig 6은 레일횡방향 인장응력(S11)을 거리별 인장응력으로 나타낸 그림이다. 데이터 분석 위치는 충전층의 최하단부 레일횡방향으로 측정하였다. 인장응력(S11)은 대칭성으로 하중재하지점에서 최대 0.64MPa로 재하지점에서 멀어질수록 감소하는 경향을 확인할 수 있다. Fig 7은 레일방향 인장응력(S33)의 컨투어이며, Fig 8은 거리별 인장응력으로 나타낸 그림이다. 레일횡방향 인장응력(S11)과 비슷한 경향을 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 최대인장응력은 충전층 최하단부 하중재하지점에서 1.01MPa로 허용 인장응력에 만족하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 급속경화레도의 온도하중을 고려하였을 때 허용인장응력 기준을 초과할 수 있기 때문에 온도응력해석을 검토하여 보완할 필요가 있다고 판단된다.

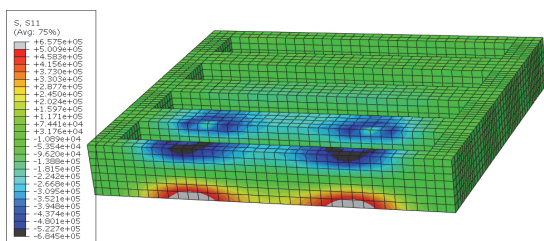


Fig 5. Contour of tensile stress on the poured layer(S11)

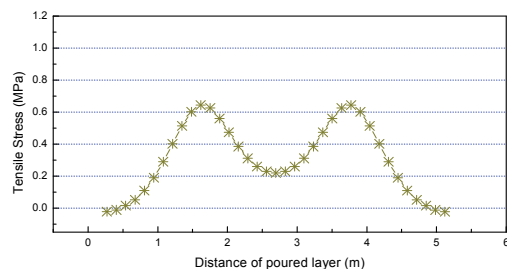


Fig 6. Stress variation according to distance of poured layer(S11)

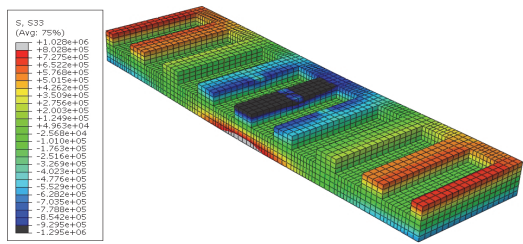


Fig 7. Contour of tensile stress on the poured layer(S33)

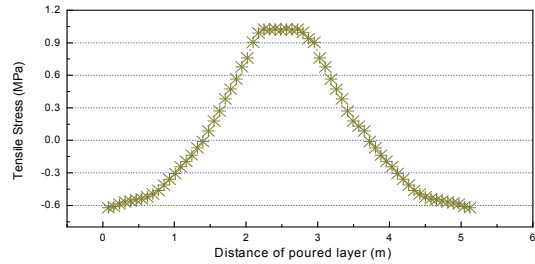


Fig 8. Stress variation according to distance of poured layer(S33)

### 3.2 표준단면에서의 전단응력특성

기본단면에서 발생하는 전단응력 특성에 대하여 각 방향에 대한 최대전단응력 발생지점을 도출하기 위해 검토를 수행하였다. 전단응력은 레일패드와 침목, 침목과 충전층의 경계지역에서 발생하며 큰 응력을 Fig 9와 Fig 10에서 확인할 수 있다. 레일횡방향과 하중재하방향으로 발생하는 전단응력(S12), 레일횡방향과 레일방향으로 발생하는 전단응력(S13), 하중재하방향과 레일방향으로 발생하는 전단응력(S23)이 존재하며 해석결과는 다음과 같다.

Fig 9는 레일의 횡방향과 하중재하방향의 전단응력을 나타낸 그림이며 ○표시가 된 하중재하지점의 침목과 맞닿아있는 저부면에서 최대전단응력(S12)이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig 10은 컨투어에서 ○표시된 충전층의 전단응력(S12)을 거리별로 나타낸 그림이다. 하중재하지점으로 갈수록 점차적으로 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이며 하중재하지점인 0.8m 거리에서 최대전단응력 0.31MPa이 발생하였으며, 충전층의 구조적 안정성 이상이 없는 것으로 판단된다.

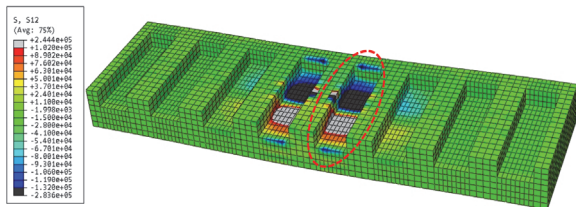


Fig 9. Contour of Shear stress on the poured layer(S12)

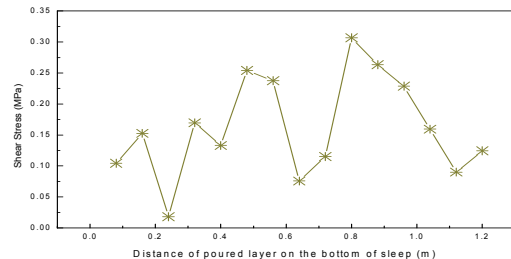


Fig 10. Shear stress variation according to distance of poured layer(S12)

Fig 11은 레일횡방향과 레일방향에서 발생하는 전단응력(S13)의 컨투어를 나타내는 그림 그림이며 ○표시가 된 하중재하지점의 침목과 맞닿아 있는 충전층의 상부에서 최대전단응력(S13)이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig 12는 컨투어에서 ○표시된 충전층 상부의 전단응력(S13)을 거리별로 나타낸 그림이다. 전단응력특성은 하중재하지점에 가까울수록 크기가 증가하다가 하중재하지점을 지나면서 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 하중재하지점인 0.8m 거리에서 최대전단응력 0.23MPa이 발생하였다.

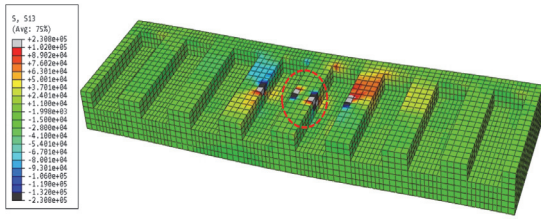


Fig11. Contour of Shear stress on the poured layer(S13)

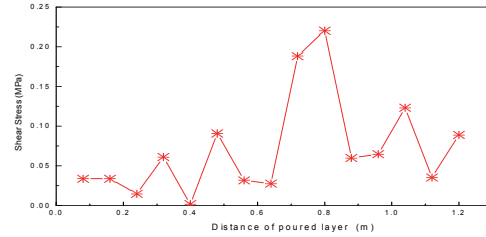


Fig 12. Shear Stress variation according to distance of poured layer(S13)

Fig 13은 하중재하방향과 레일방향에서 발생하는 전단응력(S23)의 컨투어를 나타낸 그림 그림이며 ○표시가 된 하중재하지점의 침목과 맞닿아 있는 충전층의 측면부에서 최대전단응력(S23)이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig 12는 컨투어에서 ○표시된 충전층 측면부의 전단응력(S23)을 거리별로 나타낸 그림이다. 전단응력특성은 하중재하지점에 가까울수록 크기가 증가하다가 하중재하지점을 지나면서 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 하중재하지점인 0.8m 거리에서 최대전단응력은 1.02MPa로 상당히 크게 나타났다. 최대전단응력 발생지점 부근의 평균 전단강도는 0.75MPa로 나타났으나 최대응력 발생지점에서는 레일방향 인장응력(S33)과 하중재하응력(S22)이 주응력으로 작용하기 때문에 그 영향을 받아 큰 응력이 발생되었다고 판단된다. 전단응력의 값이 작지 않기 때문에 지속적으로 국부적 전단응력(S23)이 발생하는 것을 고려하였을 때 추가적으로 반복하중재하 및 온도응력 해석을 수행할 필요가 있다고 판단된다.

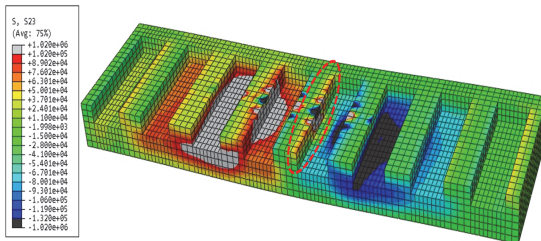


Fig 13. Contour of Shear stress on the poured layer(S23)

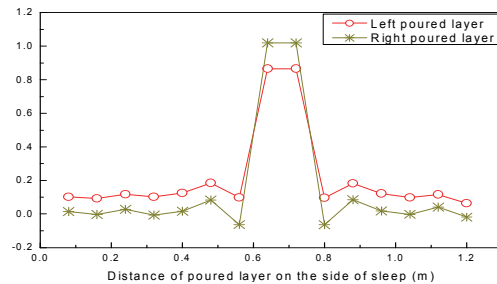


Fig 14. Shear stress variation according to distance of poured layer(S23)

#### 4. 결론

본 논문에서는 급속경화궤도 표준단면의 충전층에서 정적 하중재하시 발생하는 응력특성에 대해 검토하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 각 해석조건에 대한 해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 충전층의 두께변화에 따른 응력 및 변위의 특성을 검토하였다. 충전층의 두께는 100~350mm로 매 50mm두께로 6번의 해석을 수행하였다. 해석결과, 충전층의 두께가 350mm로 가장 두꺼운 단면에서 가장 좋은 결과를 얻었지만 경제성을 고려하였을 때 250mm두께의 단면이 가장 효율적인 것으로 판단하여 급속경화궤도의 표준단면으로 채택하여 충전층에서 발생하

는 인장응력 및 전단응력 검토를 수행하였다.

- 2) 레일방향 최대인장응력(S22)은 하중재하지점 충전층의 최하단부에서 1.01MPa이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 급속경화궤도에서 발생하는 온도하중을 고려하였을 때 허용인장응력 기준에서 탈락될 수 있기 때문에 온도응력해석을 검토하여 보완할 필요가 있다고 판단된다.
- 3) 방향별 최대전단응력은 발생지점에 따라 각 각 다르게 나타났다. 레일횡방향과 하중재하방향의 최대전단응력(S12)은 0.31MPa로 침목과 맞닿아있는 하부면에서 발생하였으며, 레일횡방향과 레일방향의 최대전단응력(S13)은 0.23MPa로 하중재하지점 침목과 맞닿아있는 상부면에서 발생하였다. 하중재하방향과 레일방향의 최대전단응력(S23)은 1.02MPa로 침목과 맞닿아있는 측면부에서 발생하였다. 검토결과 전단응력(S12, S13)은 구조적으로 안전하다고 판단되지만 전단응력(S23)의 경우에는 응력이 국부적으로 크게 발생하는 것을 고려하였을 때 추가적으로 반복하중재하 해석 및 실험을 통한 비교 분석할 필요가 있다고 판단된다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 "고속철도 자갈궤도 급속경화궤도기술 개발(13RTRP-B065581-01)"과제의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Development of the Paved track for the Low-Maintenance at Existing Lines(IV)[Cement Mortar Pouring Type], Korea Railroad Research Institute (KRRRI)
- [2] Il-Wha Lee, (2006) "Optimal Design of Cement Mortar Pouring type Paved Track" *Journal of the Korean Society for Railway*, 9(3), pp. 305-312
- [3] Il-Wha Lee, jin-wook Lee, Su-hyung Lee, hyun-suk Lee (2004) "3D FEA for the Cement Mortar Pouring type Paved Track" *Journal of the Korean Society for Railway*, pp. 109-114