

시멘트 모르타 충전형 포장궤도의 3차원 유한요소해석

3D FEA for the Cement Mortar Pouring type Paved Track

이일화* 이진욱* 이수형* 이현석**
Lee, il-wha Lee, jin-wook Lee, su-hyung Lee, hyun-suk

ABSTRACT

Recently, the development of the paved track is required as a Low-maintenance of conventional line. The main reason is that the line capacity and bearing of track are increased progressively. The most important factor of paved track is stability and applicability. To be based on this subject, Cement Mortar Pouring(CMP) paved track is developed. CMP paved track is a kind of ballast reinforced track using the prepacked concrete technique. The most important to design is characteristics of the structure. CMP slab's thickness is less than the conventional slab track and pouring layer is attached tie and roadbed directly. On this paper, to verify the basic structure of the CMP track, characteristics of the structure is investigated pouring layer, tie and interaction of the each layer using the 3D finite element analysis.

1. 서 론

세계적으로 기존 운행선의 생력화는 유지보수실감면에서 중요한 요소로 인식되고 있다. 이는 선로 용량이 증가하고 궤도의 부담력이 증가하면서 유지보수비용이 크게 증가하고 있기 때문이다. 그래서 기존선에서도 콘크리트도상화를 통한 생력화를 꾀하고 있는데, 시멘트 모르타 충전형(CMP) 포장궤도도 기존선 생력화를 위한 공법으로 연구중에 있다. CMP포장궤도는 기존선 생력화를 위한 일종의 프리팩콘크리트 도상강화공법이라 할 수 있다. CMP포장궤도의 결정에 있어 가장 중요한 것은 충전층의 구조적 특성으로 신성용 슬래트궤도보다 두께가 얇고 침목 및 노반과 바로 연결되어 있기 때문이다. 본 논문에서는 선정된 CMP포장궤도의 기본구조를 검토하기 위하여 충전층 및 침목의 구조적 특성과 충전층/침목/노반과의 연결면에서의 구조적 특성을 연구하였다.

2. 포장궤도의 구조 및 재료 선정

포장궤도의 기본구조 결정을 위하여 다양한 포장궤도구조를 검토하였다. 검토대상은 우선적으로 안정성과 시공성을 고려하였다. 다음 표 1은 본 연구에서 검토하였던 포장궤도구조의 종류별 특성을 정리한 표이다. E형 포장궤도는 일본 포장궤도의 초기모델로서 구조적 성능과 내구성엔 검증되었지만, 시공 공정이 복잡하고, 시공단가가 비싼 것이 단점이다. 또한 충전 재료로 사용되는 CAM의 국내 수급이 어렵고, 온도변화에 민감한 경향이 있다. 그래서 개념설계를 위하여 채택한 기본 포장궤도구조는 TC형 포장궤도를 기반으로 한 시멘트 모르타 충전형 포장궤도를 선택하였다. 시멘트 모르타 충전형 포장궤도 방식은 무엇보다 기계화시공이 가능하고 자갈교환방식 중 가장 시공비가 저렴하다. 구조선정 및 개념설계를 위한 고려사항은 다음과 같다.

* 한국철도기술연구원 레도트목연구본부 선임연구원, 경제원

** 한국철도기술연구원 레도트특연구분부 연구원, 정희원

- 1) 국내 자갈레도에 시공가능한 포장레도구조일 것.
- 2) 열차차단시간내 일정공사가 가능하고 시공속도가 20m/h이상일 것.
- 3) 기계화시공이 가능하고 시공공정이 간단할 것.
- 4) 유지보수비가 기존 자갈도상레도의 20%이하이고 콘크리트슬래브레도와 동등한 수준의 성능을 발휘할 것.
- 5) 레도재료의 국내제작 또는 제조가 가능할 것.
- 6) 레도의 저탄성화 추세에 맞도록 레도저지강성이 20MN/m²이하일 것.

표 1. 포장레도의 종류별 특징

포장레도 종류	도상강화레도	E형 포장레도	SU 크라우트보강형 포장레도	TC형 포장레도
침목폭(mm)	-	733	400~600	400
충진재	시멘트아스팔트 모르터	시멘트아스팔트 모르터	시멘트아스팔트 모르터+시멘트모르터	시멘트모르터
레도조성	MTT 또는 특수장비	특수장비	MTT 또는 특수장비	MTT 또는 특수장비
충진방식	강제압입	자연유하	자연유하	자연유하
토목접유사용여부	×	○	○	○
도상교환여부	×	○	○	○
열차시행	○	○	○	×
온도영향	소	중	중	소
안전성	중	대	대	대
시공성	대	소	중	대
경제성	대	소	중	중
내구성	중	대	대	대
신뢰성	소	대	대	대

2.1 충진재

포장레도의 충진재는 고유동, 초속경, 부수축성을 기본적으로 가지며, 내구성 및 경제성이 높아야 한다. 충진재의 가장 중요한 요구사항은 유동성으로 균등 또는 불균등한 자갈입자사이에 공극이 없이 충진 되어야 한다. 충진 방식이 자연유하방식이기 때문에 재료자체의 유동성이 매우 높아야 하며, 지관된 자갈의 입도분포도 개선되어야 한다. 초속경성이 요구되는 이유는 차단공사 직후 열차운행에 지장을 주지 않기 위하여 1시간 기준 일축압축강도가 0.2MPa이상 요구된다.

2.2 체결구

체결구의 기본조건으로는 슬래브레도용으로서 상하 30mm, 좌우 ±25mm까지 조정 가능한 체결방식이며 선정시 고려사항은 향후 유지관리성과 경제성이다.

2.3 침목

침목은 기본적으로 폭을 400mm 이상, 두께는 180mm이하로 한다. 폭과 두께를 결정하기 위하여 고려해야 할 사항은 침목의 구조안정성, 현장에서의 작업성으로 캐광조립 후 MTT작업의 여유 공간 확보가 중요하다. 보선장비제조사의 자료에 의하면 최대 침목폭이 약 600mm까지는 작업이 가능한 것으로 조사되었으나, 침목폭이 과다하게 커질 경우, 체결간격도 커지거 때문에 레도시스템에 대한 검토 후 적절한 폭과 두께를 결정하여야 한다. 또한 현재의 침목설계기준을 따를 경우, 침목폭을 400mm이상으로 하면 횡 방향 철근보강이 요구될 가능성이 크다.

2.4 토목섬유

토목섬유는 시공성에 매우 큰 영향을 미친다. 일본의 경우, 시공중에 문제가 발생한 경우의 대부분이 토목섬유 시공에서 발생하였다. 시공중 충전 재료의 누출 등을 유발하며 현장 대처가 어렵다. 그래서 JR동일본에서는 현재 토목섬유와 기무집을 같이 사용하고 있으며, 시공성을 떨어뜨리는 주요 요인이 된다. 토목섬유의 구조는 단순한 충전 재료의 누출을 방지하는 목적과 상부 구조의 탄성부가 기능으로도 적용할 수 있다.

2.5 도상조건

포장재료의 관제로 사용되는 도상자간은 체분석을 통하여 적정입도 범위만 사용한다.

2.6 노반조건

일본의 경우, 포장재도를 적용할 수 있는 노반조건(K_{30})을 7kgf/cm^3 이상으로 적용하고 있다. 그러나 국내 기존의 노반상태를 조사한 결과, 분니 발생 구간에서도 10kgf/cm^3 이상의 값을 가지는 것으로 나타났는데, 이는 기존선의 노반상태가 노반재료로만 구성되는 것이 아니라 장기간의 자갈관입 등으로 노반상태가 많이 오염이 되어 실제 지지력보다 과다하게 계측되는 것으로 나타났다. 그리고 문제개소의 경우는 노반의 증빙로 지지력차가 많았기 때문에 중간 지지력을 비교, 산정할 수 있는 시험 기법이 필요하며, 포장재료의 적용 기준(K_{30})은 11kgf/cm^3 이상으로 적용하기로 하였다.

3. 구조검토를 위한 유한요소해석

구조해석은 2절에서 제시된 개념설계안을 바탕으로 수행하였다. 레도구성봉에 대한 설계가 아직 이루어지지 않았기 때문에 충전 재료 개발을 위한 검토를 주로 수행하였다. 주요 해석내용은 기본 안에 대한 구조검토, 충전층의 누계 및 충전 재료의 강성에 따른 거동해석이다.

3.1 해석 조건 및 제한

포장레도가 요구되는 개소는 기존선 중 2구선 이하일 것으로 판단되지만, 해석조건은 1구선과 2구선의 조건을 같이 고려하였다. 경부선의 경우, 최고 운행속도가 150km/h 에 육박하고 향후 설계속도가 200km/h 가 될 가능성이 크기 때문에 장기적 관점에서의 적용성을 고려하여 설계속도를 200km/h 로 결정하였다. 레일은 기존선에서 대부분의 개소가 50kg 레일이 부설되어 있고, 60kg 레일도 체결구의 절연탈락을 조정하여 사용가능하므로 안전측 설계를 위하여 50kg 레일을 적용하였다.

CMP포장레도 해석을 위하여 포장레도의 물성치를 표 2와 같이 구성하였다. 포장레도의 구성은 상부로부터 침목, 충전층, 도상층, 혼합층 그리고 노반으로 구성시켰다. 노반의 지지력은 $K_{30}(\text{kgf/cm}^3)$ 값을 11이상으로 하였다. 포장레도해석을 위한 가정은 다음과 같다.

표 2. 사용 물성치

	치수(mm)	V_c (t/m^3)	E (MPa)	ν
레일	50kg/m	-	210,000	0.3
침목	2,400×400×160(H)	2.3	30,000	0.167
충진층	-	2.3	17,000	0.2
도상층	-	1.7	100	0.3
혼합층	-	1.6	150	0.3
노반	$11 \geq K_{30}(\text{kgf/cm}^3)$	1.8	50	0.33

- 1) 노반과 충전층 및 침목의 각층은 연속체로 가정하고, 층간에서 미끄러지지 않는다.

- 2) 각 층은 모두가 균일한 등방탄성체로 하였다.
- 3) 해석 모델은 좌우 대칭성으로부터 전체의 1/4에 대해서 사각형 요소로 분할하였다.
- 4) 하중조건은 탄성해석을 위한 단위하중으로서 레일압력 9.68tonf을 침목 위 레일의 중심에 해당 하는 위치에 작용시켰다.

3.2 3차원 FEM해석

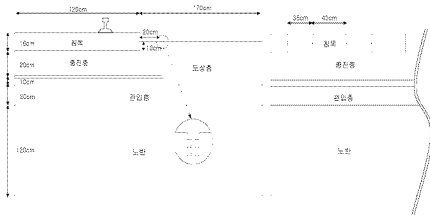


그림 1. 3차원 해석모델

3차원해석 모델링에서는 실제 거동과 유사하게 해석하기 위하여 다양한 층을 포함하였다. 상부로부터 층권이 되는 도상자갈층인 충진층, 기판도상과 세립분이 산포하고 있는 하부도상층, 도상이 관련된 노반인 관상층 그리고 노반층으로 구성하였다. 접촉요소는: 레일과 침목, 충진층과 도상층사이의 도목 삽유층을 스프링요소로 표현하였다. 레일은 50kg/m의 빔요소를 사용하였으며 각 층의 요소는 변위 형태를 완만하게 표현하기 위하여 8 node incompatible mode 요소가 사용되었다. 해석시간을 줄이기 위하여 노반의 종방향과 횡방향에 대하여 대칭모델을 사용하여 해석단면은 실제의 1/4의 크기를 가진다. 또한 일반적으로 하중이 재하되는 침목을 포함하여 3번째 침목까지만 유효하중이 분포하는 것으로 가정하지만 실제 하중분포를 파악하기 위하여 7개의 침목을 배치하였다.

3.3 포장계도구조의 응력 특성

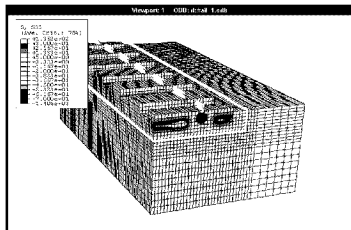


그림 2. 포장계도구조의 연직방향 주응력

3차원 모델을 이용하여 기본구조모델의 연직방향 주응력을 검토하였다. 그림 2는 하중재하 시 포장재도의 연직방향 주응력분포를 나타낸 그림으로서 각 층별로 응력의 구분되는 것을 볼 수 있다. 충전층 하부 자갈도상면에서 응력분포는 $0.3\sim 1.1\text{kg/cm}^2$ 의 범위로 도상자갈재도보다 응력전과범위가 작은 것으로 해석되었다. 특이사항은 침목과 충전층 사이에 과다한 인장응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 두 재료의 강성차가 2배 정도이고 침목두께가 16cm로 비교적 얇게 모델링하였기 때문으로 판단되며, 실제 접촉면에서 인장응력이 크게 발생할 것으로 예상된다.

3.4 충전층의 응력 특성

충전층은 포장재도구조 중 가장 강성이 큰 층으로서 응력집중이 가장 크다. 해석시 사용된 충전층의 세위는 탄성계수가 $17,000\text{MPa}$ 이고 두께는 20cm, 폭은 1.4m이다. 침목하중에 대하여 충전층에서의 응력분포는 하중재하선의 위치에 따라 압축과 인장응력이 복잡하게 작용한다. 충전층의 저면의 인장 응력분위는 $3.0\sim 10\text{kg/cm}^2$ 이며 하중재하 침목의 직하에서는 최대 인장이 발생하고 도상과 충전층의 접촉면에서 최대 압축이 발생한다. 그림 3은 침목직각방향, 즉 재도의 길이방향의 응력도로서 하중재하선에서 첫 번째, 두 번째 침목사이에서만 압축이 발생하고 5번째 침목까지는 인장응력이 고르게 작용하는 것으로 해석되었다. 그림 4는 침목 수직방향의 전단응력으로서 하중재하 침목과 충전층의 접촉면에서 가장 큰 전단응력이 발생하는 것으로 해석되었다.

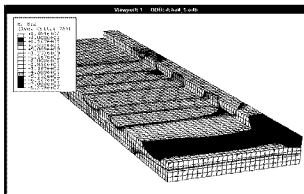


그림 3. 침목 직각방향의 압축 및 인장응력도

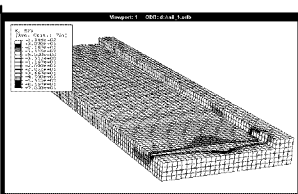


그림 4. 침목 수직방향의 전단응력도

3.5 침목의 응력 특성

침목에서의 응력은 하중재하 침목을 포함하여 전후 4개 침목까지만 응력이 작용하며 주로 전후 2개 까지만 인장 응력이 많이 작용한다. 침목에서는 응력이 비교적 고르게 분포하며, 침목 단부의 모서리 부분에 응력이 집중하는 것을 알 수 있다. 응력은 압축과 인장성분이 하중작용점에 따라 다르게 작용하며 장기사용에 의한 피로검토가 요구된다.

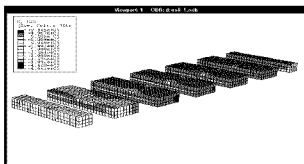


그림 5. 침목 직각방향의 압축 및 인장응력도

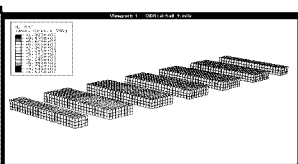


그림 6. 침목 직각방향의 전단응력도

3.6 충전층의 두께 및 강성변 변화

충진 재료개발 시 필요한 검토자료로서 충전층의 두께와 강성변화에 따른 궤도변형특성을 검토하였다. 검토항목은 레일에서의 탄성 변위량을 검토하였다. 그림 7은 충전 재료의 강성별 포장체도의 변위 특성을 비교한 그림이다. 재료강성(탄성계수)은 200~25,000MPa까지로서 200MPa는 아스팔트계열의 충전 재료특성을 나타내고 25,000MPa은 고강도 시멘트계열의 충전특성을 나타낸다. 재료강성에 따른 탄성변위의 변화량은 크지 않으며 일정값 이상에서는 선형적으로 변위가 감소하였다. 200MPa인 경우에도 탄성변위는 1.2mm로서 설계기준은 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 일반적으로 TC형 포장체도에서 사용하는 충전재의 강성은 17,000MPa이다.

그림 8은 충전층의 두께별 탄성계수를 나타낸 그림으로서 재료강성이 17,000MPa이고 충전 두께가 10, 20, 30cm일 경우의 변위를 비교하였다. 충전 두께에 대해서도 선형적인 관계를 가지며, 변위의 변화량은 크지 않았다.

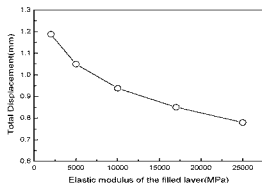


그림 7. 충전 재료의 강성에 따른 탄성변위

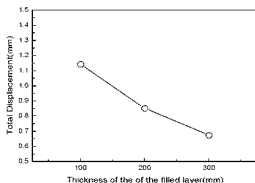


그림 8. 충전층의 두께에 따른 탄성변위

본 해석에서는 노반지지력($11\text{kgf/cm}^3 \geq K_{30}$) 및 궤도조건이 양호하여 해석조건별 궤도변형특성이 양호한 것으로 해석되었으나, 노반 연약화, 지하수의 영향, 도상층의 오염 등으로 고려하게 되면, 보다 불량한 결과가 예상된다. 향후 추가적으로 검토할 항목은 다음과 같다.

- 1) 타설직후 열차운행시점의 구조안전성 검토
- 2) 충전층 두께 및 강성 결정
- 3) 침목의 폭, 두께, 체결간격 결정
- 4) 궤도저탄성화를 위한 체결구 패드 및 토목선유 결정
- 5) 다양한 노반조건(지하수, 분니, 연약지반) 검토

4. 결 론

포장체도 기본구조시스템에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과, 변위기준은 슬래브레도와 동등한 성능을 보였으며 충전층의 두께와 강성변화에 따른 변위특성도 기준을 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 충전층과 침목의 접촉면과 침목단부의 모서리에서 응력이 집중하는 현상이 나타나 장기사용시의 취약요인이 될 것으로 예상되기 때문에 향후 구조변형을 통한 개선이 요구된다.

참고문헌

1. "기존선 자갈궤도 생략화를 위한 포장체도개발"(2004), 한국철도기술연구원
2. 이일화, 황선근, 김현기, 조용권(2000), "고속전철 강화노반의 침하특성에 관한 연구" 대한토목학회 논문집, 제20권 제6-D호 pp.481~493.
3. 小關昌信外 3人(1995), "低廉型既設線用鋪裝軌道の開發", RTRI REPORT, VOL. 9, P.25~P.30