

## 터널구간 직결아스팔트궤도의 최적 설계차트 개발

## Design Charts for Optimum Thickness of Tunnels Direct Fastening Asphalt Trackbed

이성혁\*, 정영남\*\*, 임상진\*\*, 조호진\*\*†, 임유진\*\*

Seong Hyeok Lee\*, Young Nam Jung\*\*, Sangjin Lim\*\*, Hojin Cho\*\*†, Yujin Lim\*\*

**Abstract** In this study, primary design parameters such as types of track section, wheel load size, velocity, MGT, elastic modulus and thickness of each layers are defined for optimum design of asphalt thickness adapted in the asphalt trackbed foundation in tunnels. 3D FEA were performed using ABAQUS program to compute tensile strain under asphalt layer with different values of design parameters defined. Using Miners' theory with computed structural analysis results, design charts to decide design life of asphalt trackbed foundation in the tunnels are produced.

**Keywords** : Asphalt slab track, Finite element analysis, Miner's rule, Design life, Tunnel

**초 록** 본 연구에서는 터널구간에 적용할 직결 아스팔트 노반 궤도의 최적 두께 결정을 위한 설계차트를 개발하기 위하여, 주요 설계인자로서 궤도구조형식, 운중 및 속도, 연간 통과톤수(MGT), 재료 물성(원지반 및 콘크리트 보조도상 탄성계수), 아스팔트 노반층의 두께 등을 설정하였으며 이들 설계인자의 조합을 달리하면서 운중 재하시 아스팔트 노반 하면에서의 인장변형률을 ABAQUS 3D 구조해석을 통해 분석하였다. 구조해석 분석결과와 손상도 이론에 의한 Miner법칙을 활용하여 터널구간용 직결 아스팔트 궤도구조(단면구성)에 대응하는 설계수명(내구년한) 결정 설계차트를 개발하였다.

**주요어** : 터널구간 직결아스팔트 노반, 유한요소해석, Miner법칙, 설계수명

## 1. 서 론

아스팔트 궤도는 자갈도상 궤도와 콘크리트 슬래브 궤도의 유지보수성과 경제성을 고려하여 장단점을 상호보완하고 극복할 수 있는 신개념의 궤도이다. 독일 등 철도 선진국에서는 아스팔트 궤도를 부설하여 공용중에 있으며 현재 국내에도 도입을 위한 연구가 진행중에 있다.

본 연구에서는 터널구간에 대한 아스팔트 궤도 설계법을 개발하기 위한 선행작업으로서 온도조건에 따른 아스팔트 혼합물의 탄성계수의 크기변화, 운중, 원노반 및 콘크리트 보조도상의 강성, 통과톤수(MGT) 등을 설계변수로 하여 궤도의 역학적 특성변화를 유한요소해석 프로그램을 이용한 구조해석을 통하여 분석함으로써 해석결과로부터 최적 궤도구조 설계차트를 개발하였다.

† 교신저자: 배재대학교 건설환경철도공학과 (hojin@pcu.ac.kr)

\* 한국철도기술연구원

\*\* 배재대학교 건설환경철도공학과

## 2. 유한요소해석에 의한 직결 아스팔트 궤도의 거동 분석

### 2.1 궤도구조 해석조건 및 해석방법

터널구간 직결아스팔트 궤도에 대한 구조해석을 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아스팔트 궤도구조를 3차원(3D)으로 모델링 하였다. 궤도를 구성하는 각 구성 요소의 모델링을 위하여 레일은 빔(beam)요소로 국제철도연맹 규격인 UIC60과 동일한 단면을 사용하였으며, 레일과 침목과의 체결부는 패드(Pad)의 스프링 요소를 이용하여 스프링 계수 40kN/mm를 적용하였다. 침목 및 각 노반층은 Solid요소를 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 원노반의 강성은 300MPa로 해석하였다. 콘크리트 보조도상은 설계기준강도( $F_{ck}$ )가 24MPa에 해당하는 23,000MPa를 적용하였다. 유한요소해석에 적용한 물성치인 동탄성계수, 포아송비 및 밀도는 Table 1과 같다.

**Table 1** Material input values used in numerical analysis

	Elastic Modulus E(MPa)	Poisson's ratio $\nu$	Density $\rho$ (ton/m <sup>3</sup> )
Rail	210,000	0.3	7.8
Pad	40,000 kN/m	-	-
Sleeper	29,100	0.17	2.3
Asphalt mixture	5,000(Spring) 3,000(Summer) 4,000(Fall) 8,000(Winter)	0.35	2.3
Sub-ballast	23,000	0.15	2.3
Base	300	0.2	2

### 2.2 터널구간 직결 아스팔트 궤도 모델링

터널구간 직결 아스팔트 궤도의 해석 단면 및 3D 유한요소 모델은 Fig. 1과 같다. 궤도 노반의 높이는 3.6m이며, 콘크리트 보조도상 두께는 20cm를 적용하였다. 아스팔트 콘크리트 도상의 두께는 12cm, 15cm, 18cm로 각 3cm씩 증가시키며 구조해석을 실시하였다.

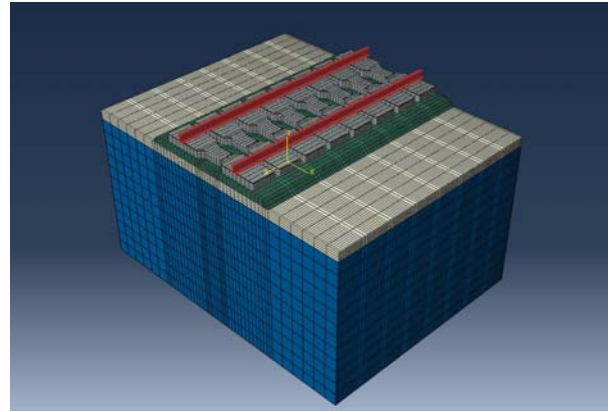
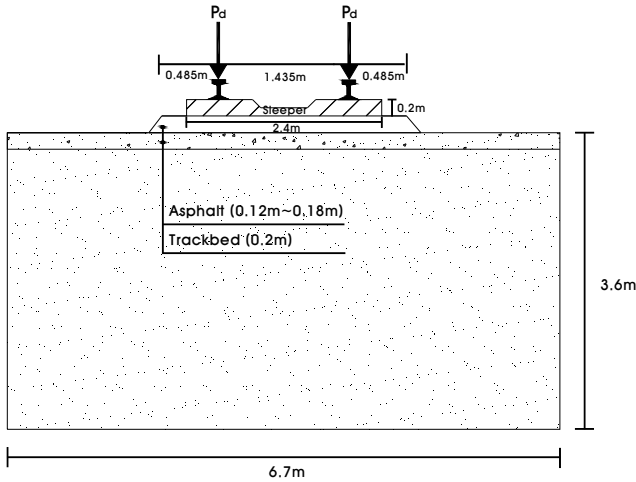


Fig. 1 3D finite element modeling of direct fastening asphalt track structure

해석에 사용한 하중은 Fig. 2와 같이 KRL-2012 표준열차하중이다. KTX열차 축하중 220kN의 1/2인 110kN을 정적운중으로 정한 후 열차하중의 동적 효과를 고려하기 하여 식 (1)과 같은 동적할증계수를 사용하였다. 열차속도 300km/h에 해당하는 동적할증계수(DAF) 및 유효운중계수 (1.2)를 곱하여 동적운중 175kN을 결정하였다. 또한 레일 전구간에 80kN/m의 등분포 하중을 적용하였다.

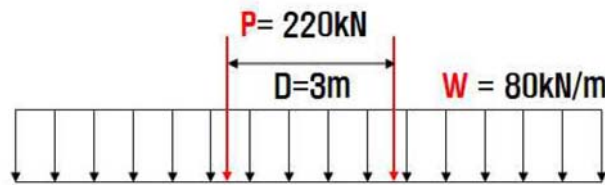


Fig. 2 KRL-2012 design load

$$P_{dyn} = P_{eff} \times DAF \quad (1)$$

여기서,  $60 < V \leq 300 \text{ km/h}$  여객열차일 경우,  $DAF = 1 + t \cdot \phi \left( 1.0 + 0.5 \frac{V - 60}{190} \right)$ ,  $P_s$  : 정적운중

(kN),  $P_{eff}$  : 유효운중( $P_s \times 1.2$ , kN),  $P_{dyn}$  : 동적운중(kN),  $DAF$  (Dynamic Amplitude Factor) : 동적할증계수,  $t$  : 확률의 신뢰구간에 좌우되는 표준편차의 가중치(접촉응력, 노반계산시  $t=1$  적용),  $\phi$  : 궤도품질에 좌우되는 계수(매우 양호한 궤도의 경우  $\phi=0.1$  적용)

본 연구에서는 년간통과톤수에 의한 설계수명의 영향을 검토하기 위하여 현재 운행중인 경

부선 및 호남선의 연간누적통과톤수를 계산하여 중(重)교통에 해당하는 40MGT/yr를 교통량으로 결정하였다.

### 3. 유한요소해석 결과 및 설계수명 예측

#### 3.1 아스팔트 하면에서의 최대 인장변형률 결과

하중조건 175kN, 아스팔트 노반 두께  $t_{ASP} = 12, 15, 18\text{cm}$ , 원노반 탄성계수  $E_{base} = 300\text{MPa}$ , 콘크리트 보조도상 탄성계수  $E_{SB} = 23,000\text{MPa}$ 일 때 아스팔트 노반층 하면에서의 인장변형률( $\epsilon_t$ ) 발생추세는 Fig. 2와 같다.

동일 운중조건( $P_s=175\text{kN}$ )에서 콘크리트 보조도상 탄성계수( $E_{SB}$ )가 23,000MPa이고, 원지반 탄성계수( $E_B$ )가 300MPa일 때, 아스팔트 동탄성계수( $E_{ASP}$ )가 증가하면 아스팔트 하면에서의 인장변형률이 비선형적으로 감소하는 경향이 확인되었다.

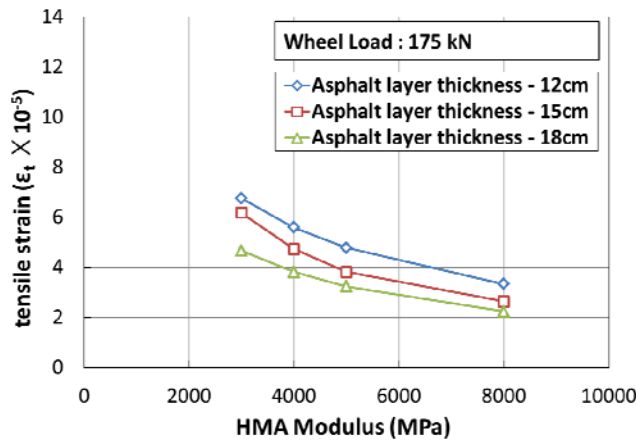


Fig. 2 Tensile strains computed at the bottom of asphalt trackbed layer

#### 3.2 설계수명 결정 차트 개발

터널구간 직결 아스팔트궤도의 운중, 연간통과톤수(MGT) 및 아스팔트 노반의 탄성계수 변화에 따른 설계수명에 대한 분석결과로부터 설계 파라미터 사이의 상관관계를 보다 명확하게 파악할 수 있도록 하나의 설계차트로 재구성하였다. 재구성하는 방법은 직결 아스팔트 노반궤도 형식으로 운중은 175kN으로 결정한 후, 콘크리트 보조도상 탄성계수( $E_{SB}$ ), 원노반 탄성계수( $E_B$ ), 연간통과톤수(MGT)를 고려하여 설계자가 적정 아스팔트 노반두께( $t_{ASP}$ )를 선택하여 해당 설계 파라미터의 조합(궤도구조형식, P,  $E_{SB}$ ,  $E_B$ , MGT,  $t_{ASP}$ )이 목표 설계수명(예: 50년)을 만족할 수 있는지의 여부를 판단할 수 있도록 하는 것이다. 구조해석으로부터 계산된 아스팔트 노반 하면에서의 인장변형률 및 기존 아스팔트 도로포장을 위하여 사용되고 있는 파괴기준식을 이용하여 임의 궤도구성단면과 재료조합 및 운중, 연간통과톤수 등에 대해 손상도 이론에 입각한 설계수

명을 산정하였다. 상세한 설계로직 개발과정은 [4]에 소개되어 있다. Fig. 6은 아스팔트 노반의 피로파괴를 고려하여 개발된 설계차트의 일부이다.

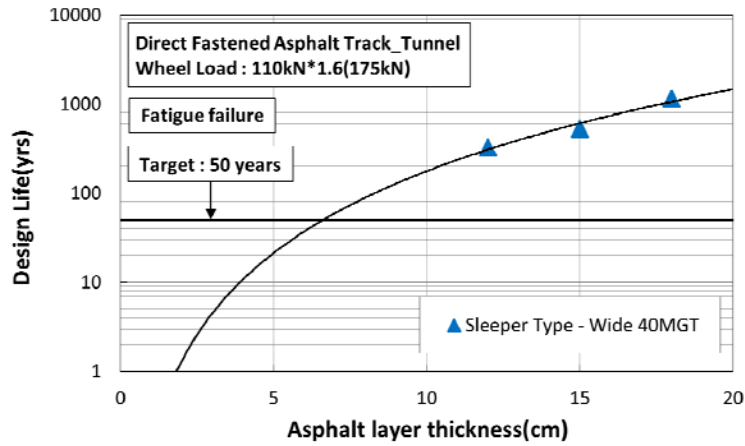


Fig. 6 Proposed design charts for computing design life

#### 4. 결론

본 연구에서는 터널구간 직결 아스팔트 노반의 최적 설계차트를 개발하기 위하여 주요한 설계파라미터인 열차 하중(윤중) 및 속도, 연간통과톤수(MGT), 재료 물성(원노반 및 콘크리트 보조도상 탄성계수), 아스팔트 노반 두께 등의 항목을 먼저 설정하였다. 설정된 설계파라미터(항목)의 조합을 달리하여 아스팔트 노반 하면에서의 인장변형률을 3D 유한요소해석에 의한 구조해석을 통해 분석하였다. 구조해석으로부터 계산된 아스팔트 노반 하면에서의 인장변형률 및 기존 아스팔트 도로포장을 위하여 사용되고 있는 아스팔트의 피로파괴 기준식을 이용하여 임의의 궤도구성단면과 재료조합 및 윤중, 연간통과톤수 등에 대해 손상도 이론에 입각한 설계수명을 산정하였다. 설계파라미터 조합을 달리하는 임의의 구성조건에서 산출된 설계수명을 재분석하여 최적의 설계구성 및 설계단면을 결정할 수 있는 설계차트를 개발하였다. 또한 철도 차량에 따른 윤중(P) 및 교통량에 따른 연간통과톤수(MGT), 시공특성을 반영한 하부지반 탄성계수( $E_B$ )를 추가, 철도의 사용환경에 따른 설계차트를 세분화하여 목표 설계기간 동안 궤도의 안정적 공용성을 제공할 수 있는 최적의 아스팔트 노반 설계차트를 개발할 예정이다.

#### 후 기

이 논문은 한국철도기술연구원 “철도건설 및 운용비 절감을 위한 경제성 향상 기술개발” (-고속화에 대응한 철도 아스팔트 노반 및 궤도구조 개발-)과제의 지원을 받아 수행된 성과물로서 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] AASHTO (2002) 2002 Design guide of new and rehabilitated pavement structures, Research Report, National Cooperative Highway Research Program, USA.
- [2] Y. H. Huang, J. G. Rose, C. J. Khoury (1987) Thickness design for hot-mix asphalt railroad trackbeds, The 1987 Technical Sessions of the Association of Asphalt Paving Technologies, Reno, Nevada.
- [3] D. Li (1994) Railway track granular layer thickness design based on subgrade performance under repeated loading, PhD dissertation, Department of Civil Engineering, University of Massachusetts, Amherst, Mass.
- [4] G.W. Song (2013) Development of thickness design charts for asphalt trackbed foundation based on 3D finite element analyses, *Master's Thesis*, PaiChai University.