

3D 유한요소해석에 의한 직결 아스팔트 노반 궤도의 설계수명 예측

Prediction of Design Life of Asphalt Slab Track Foundation using 3D FEA

임유진*, 송근우*, 조호진*†, 이성혁**

Yujin Lim*, Geunwoo Song*, Hojin Cho*†, Seonghyeok Lee**

Abstract In this study, primary design parameters such as types of track sections, wheel load size, velocity, MGT, elastic modulus and thickness of each layers are defined. Full 3D Finite element analyses were performed using ABAQUS program in order to calculate tensile strains under asphalt layer and vertical stresses at top of subgrade with different values of design parameters defined. Using Miners' theory with computed structural analyses results, design charts to decide design life of the asphalt trackbed foundation are produced.

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

초 록 본 연구에서는 직결 아스팔트 노반 궤도의 최적 두께 결정을 위한 설계차트를 개발하기 위하여 주요 설계인자로서 궤도구조형식, 열차 하중(윤중) 및 속도, 연간통과톤수(MGT), 재료 물성(흙노반 및 강화노반 탄성계수), 각 층구조별 두께(강화노반 및 아스팔트 노반) 등을 설정하였으며 이들 설계인자의 조합을 달리하면서 윤중 재하시 아스팔트 노반 하면에서의 인장변형률 및 흙노반 상면에서의 수직변형률을 ABAQUS 프로그램을 이용한 3D 구조해석을 통해 분석하였다. 구조해석 분석결과와 손상도 이론에 의한 Miner법칙을 활용하여 임의 직결 아스팔트 궤도구조에 대응하는 설계수명(내구년한) 결정을 위한 설계차트를 개발하였다.

주요어 : 직결 아스팔트 노반, 유한요소해석, Miner법칙, 설계수명

1. 서 론

최근 철도는 철도수송량의 증가와 고속화에 따라 궤도의 안정성과 내구성을 확보하기 위한 새로운 궤도 구조 설계가 필요한 시점이다. 아스팔트 노반궤도는 이미 독일 등 국외 철도선진국에서 실용화 되어 보편적으로 적용되고 있으며 최근 국내에서는 궤도의 지지력과 주행 안정성을 개선하기 위한 목적으로 아스팔트 노반궤도의 도입을 기술적으로 검토 중에 있다. 따라서 아스팔트 궤도가 설계에 고려될 경우를 상정하여 궤도 구조형식, 환경조건에 의한 아스팔트의 유변학적 특성에 따른 탄성계수의 크기변화, 윤중, 흙노반 및 쇄석강화노반의 강성, 통과톤수, (MGT) 등 궤도의 역학적, 구조적 특성변화를 파악하여 이를 기반으로 설계방법을 개발할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아스팔트 노반 궤도구조에 대한 다양한 구조해석을 실시하였다.

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

* 배재대학교 건설환경철도공학과

** 한국철도기술연구원

2. 유한요소해석을 이용한 아스팔트 노반궤도의 거동 분석

2.1 궤도구조의 해석 조건 및 방법

궤도구성 단면은 국내 고속철도와 동일하게 구성하였으며 5개의 침목이 설치된 성토단면을 해석대상으로 하였다. 5개의 침목 중 가운데 침목에 하중이 재하되는 상황을 상정하였다. 궤도를 구성하는 각 구성 요소의 모델링을 위하여 레일은 빔(**beam**)요소로 국제철도연맹 규격인 UIC60과 동일한 단면을 사용하였으며, 침목의 연결은 패드(**Pad**)의 스프링(**Spring**) 요소를 이용하여 스프링 계수 40kN/mm를 적용하였다. 침목 및 각 노반은 솔리드(**Solid**)요소를 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 흙노반은 지반 강성의 차이를 두어 각각 50MPa, 80MPa, 120MPa로 변화를 주어 해석하였다. 강화노반의 경우 입도조정쇄석을 이용한 중형 공진주 시험의 결과중 비교적 작은 값인 120MPa를 적용하였다. 유한요소해석에 적용한 물성치인 동탄성계수, 포아송비 및 밀도는 다음 Table 1과 같다.

Table 1 Material input values used in numerical analysis

	Elastic Modulus E(MPa)	Poisson's ratio ν	Density ρ (ton/m ³)
Rail	210,000	0.3	7.8
Pad	40,000 kN/m	-	-
Sleeper	29,100	0.3	2.3
Ballast	100	0.2	2
Asphalt mixture	4,000(Spring) 2,000(Summer) 3,000(Fall) 10,000(Winter)	0.35	2.3
Sub-ballast (Reinforced roadbed)	120	0.2	2
Subgrade	50	0.3	2
	80		
	120		
Base	80	0.3	2

2.2 직결 아스팔트 궤도 모델링

직결 아스팔트 궤도의 해석 단면 및 3D 유한요소 모델링은 Fig. 1과 같다. 총 길이는 14.4m로 국내 고속철도궤도와 동일하게 구성하였으며, 궤도 노반의 폭은 4.5m로 가정하였다. 강화노반을 포함한 노반의 총 깊이는 3.6m로 적용하였고 강화노반은 두께 40cm를 적용하였으며 아스팔트 노반 두께를 10cm, 20cm, 30cm로 각 10cm씩 증가시키며 구조해석을 실시하였다. 또한 5개의 침목을 아스팔트 노반 상단에 위치한 형태로 모사하였다

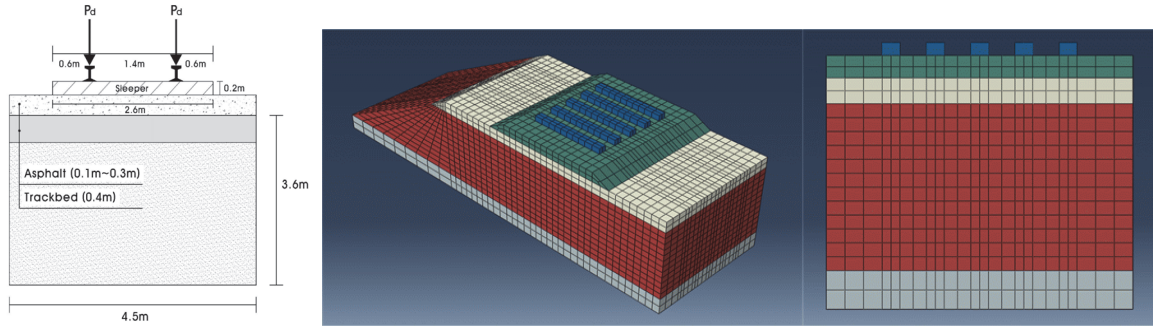


Fig. 1 3D finite element modeling of asphalt slab track structure

해석에 사용한 하중은 KTX열차 축하중 170kN의 1/2인 85kN을 정적운중으로 정한 후 열차하중의 동적 효과를 고려하기 하여 열차속도의 함수인 식 (1)과 같은 속도 충격계수를 곱하여 구하였다. 열차속도 300km/h에 해당하는 속도 충격계수 1.8을 적용하여 동적운중 153kN을 결정하였다.

$$i = 1.0 + 0.3 \left(\frac{V}{100} \right) \quad (1)$$

속도를 감안하여 아스팔트 레도상부에 가하여지는 운중의 크기를 153kN으로 환산하였으나 실제 레도상에 발생하는 운중은 정규분포(normal distribution)로 분산되는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 속도효과를 고려하여 환산된 운중 153kN을 중간값으로 하여 정규분포하는 것으로 간주한다. 따라서, 이때 정적운중의 중간값은 평균값이기도 하며 최빈값이 된다. 일반적인 정규분포를 하는 자료의 확률밀도함수는 아래 식 2와 같이 표현된다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

본 연구에서는 연간통과톤수에 의한 설계수명의 영향을 검토하기 위하여 현재 운행중인 경부선 및 호남선의 연간누적통과톤수를 계산하여 중(重)교통에 해당하는 40MGT/yr로 결정하였다.

2.3 아스팔트 노반의 설계수명 결정

2.3.1 아스팔트 노반 피로파괴 기준

본 연구에 사용한 직결 아스팔트 노반의 피로파괴기준식은 식 3과 같이 미국 아스팔트협회(AI)에 의해 제시된 아스팔트 포장용 혼합물에 대한 기준식을 사용하였다.

$$N_A = 1.8 \times C \times 6.167 \times 10^{-5} \varepsilon_t^{-3.291} E_A^{-0.854} \quad (3)$$

여기서, N_A : 피로 파괴에 대한 허용 재하횟수

ε_t : 아스팔트 혼합물층 하면의 인장변형(최대 주변형)

E_A : 아스팔트 혼합물층의 탄성계수(MPa)

C : 아스팔트 혼합물층의 공극율(V_a)와 아스팔트량(V_b)의 함수
($C = 10^M$, $M = 4.84(V_a / (V_v + V_b)) - 0.69$)

2.3.2 흠노반의 수직 영구변형 기준

미국 아스팔트협회(AI)에 제시한 도로포장 하부 노상(궤도의 흠노반에 해당) 상면에서의 영구변형에 대한 허용 재하회수 판정기준식은 아래 식 4와 같다. 이 식은 궤도하부에서도 동일하게 사용할 수 있을 것으로 예상되나 철도차량의 하중크기 및 재하속도에 의한 영향을 면밀하게 고려할 필요가 있다.

$$N_S = 1.365 \times 10^{-9} \varepsilon_z^{-4.477} \quad (4)$$

여기서, N_S : 흠노반 상면의 영구변형에 대한 허용 재하횟수

ε_z : 흠노반 상면에 있어서의 연직 방향의 압축변형

2.3.3 Miner법칙을 이용한 손상도(M_A) 분석

공용에 따른 아스팔트 노반층의 피로(fatigue)에 대한 손상도(M_A)를 분석하기 위하여 Miner법칙을 사용한다. 피로에 의한 손상도 $m_i = n_i / N_i$ 는 총 4개의 계절(봄, 여름, 가을, 겨울)에 대하여 반복하여 구하며 이를 누적하면 총 손상도손상도(M_A)가 된다. 따라서, 내용년수(설계수명)는 손상도의 역수를 취하면 계산된다. 마찬가지로 흠노반에 발생하는 누적소성변형 또한 Miner법칙을 따르는 것으로 가정하며 손상도와 이를 이용한 내용년수(설계수명)을 피로에 의한 손상도 및 설계수명과 동일한 방법으로 계산한다. 따라서, 아스팔트 혼합물층의 설계수명과 흠노반의 설계수명이 각각 계산되며 두 값을 비교하여 설계수명이 상대적으로 짧은 것을 해당 아스팔트 궤도구조의 설계수명으로 최종 결정한다.

가. 아스팔트 혼합물의 피로파괴에 관한 손상도(m_{Aj})

$$m_{Aj} = \sum (n_i / N_{Ai}) \quad (5)$$

여기서, n_i : 하중반복횟수, N_{Ai} : 피로 파괴에 대한 허용 재하횟수

나. 노상의 영구변형에 관한 손상도(m_{Sj})

$$m_{Sj} = \sum (n_i / N_{Si}) \quad (6)$$

여기서, n_i : 하중반복횟수, N_{Si} : 노상 영구변형에 대한 허용 재하횟수

계절(봄, 여름, 가을, 겨울)별 아스팔트 층의 손상도를 합계하여, 전체 손상도 M_A 를 아래 식 7로부터 구할 수 있다. 아스팔트 층 손상도 M_A 는 1이하이어야 하며, 손상도가 1을 넘을 경우 아스팔트 궤도의 단면 구조를 재검토해야한다. 단면구조의 재검토시 아스팔트층 및 강화노반 쇄석층의 두께를 변화시키거나 아스팔트층 재료의 재료물성의 변화를 줄 수 있다.

$$M_A = \sum_{j=1}^4 m_{Aj} \leq 1 \quad \text{또는,} \quad M_S = \sum_{j=1}^4 m_{Sj} \leq 1 \quad (7)$$

각 계절(온도)에 해당하는 아스팔트 혼합물의 탄성계수와 상응하는 아스팔트 노반 하면의 인장변형률 ϵ_t 는 유한요소해석을 통해 구한다. 계산된 인장변형률 ϵ_t 를 이용하여 파괴시까지의 허용재하횟수(N)를 계산한다. 또한, 발생횟수(n)는 반복횟수(N_0)와 정규분포빈도의 곱으로 구하며, 손상도(m)는 발생횟수(n)를 허용재하횟수(N)로 나누어 구한다. 여기서, 반복횟수(N_0)는 연간 교통량 즉, 연간누적통과톤수(MGT)에 목표로 하는 목표년수의 곱을 표준운중(P_0)으로 나눈값이며(식 8), 이를 다시 4계절로 나누어 각각 계산한다. 이때 정규분포로 가정한 각 하중단계에서의 운중에 대한 허용재하횟수(N)가 구해지며 이를 발생횟수(n)로 나누어 각 계절별 손상도(m_i)를 구한다.

$$\text{반복횟수}(N_0) = \text{년간통과톤수(MGT)} \times 10(\text{kN}) \times \text{목표년수(yrs)} / (4 \times P_s) \quad (8)$$

전체 손상도(M)는 각 계절(봄, 여름, 가을, 겨울)별로 구한 개별손상도 m_i 를 누적한 값이다. 전체 손상도(M)는 1을 넘지 말아야 하며 1이 넘었을 시에는 아스팔트 단면구조(두께 및 각 재료의 탄성계수)를 재검토하여야 한다.

3. 유한요소해석 결과 및 설계수명 예측

3.1 유한요소 해석 결과

3.1.1 아스팔트 하면에서의 최대 인장변형률 결과

하중조건 153kN, 아스팔트 노반 두께 $t_{ASP} = 10, 20, 30\text{cm}$, 흙노반 탄성계수 $E_{SG} = 50, 80, 120\text{MPa}$, 강화노반 탄성계수 $E_{SB} = 120\text{MPa}$ 일 때 아스팔트노반층 하면에서의 인장변형률(ϵ_t) 발생추세는 Fig. 2와 같다.

동일 운중조건($P_s=153\text{kN}$)에서 강화노반 탄성계수(E_{SB})가 120MPa일 때, 아스팔트 동탄성계수(E_{ASP})가 증가하면 아스팔트 하면에서의 인장변형률이 비선형적으로 급격하게 감소하는 경향이 확인되었다. 아스팔트 동탄성계수의 크기가 2,000MPa 이하로 감소하는 경우에 아스팔트 하면에서의 인장변형률(ϵ_t)이 매우 급격히 증가하게 되므로 매우 유념할 필요가 있음을 알 수 있다.

아스팔트 노반두께가 10cm일 경우, 아스팔트 노반층 하면에서의 인장변형률 발생 크기에 미치는 아스팔트 동탄성계수(E_{ASP})는 4,000MPa을 기점으로 그 이상에서 점차 완만해지는 경향을 보였다. 하지만 아스팔트 노반두께가 20cm, 30cm일 경우의 아스팔트 노반층 하면 인장변형률 발생 크기는 아스팔트 동탄성계수(E_{ASP}) 크기가 2,000MPa을 기점으로 그 이상에서 완만해지는 경향을 보였다. 그리고 아스팔트 동탄성계수 크기가 2,000 ~ 4,000MPa 사이에서 점차 인장변형률(ϵ_t)이 감소하고 2,000MPa이하일 경우에는 아스팔트 노반두께에 상관없이 인장변형률이 급격히 증가하는 경향을 보였다.

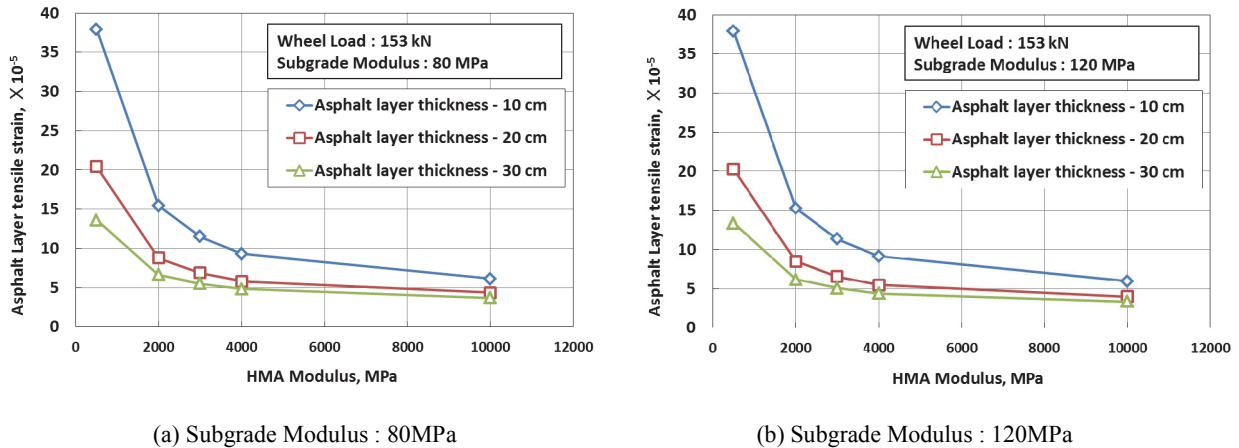
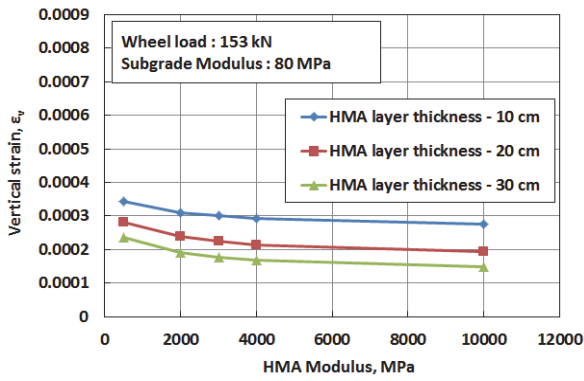


Fig. 2 Tensile strains compute at the bottom of asphalt trackbed layer

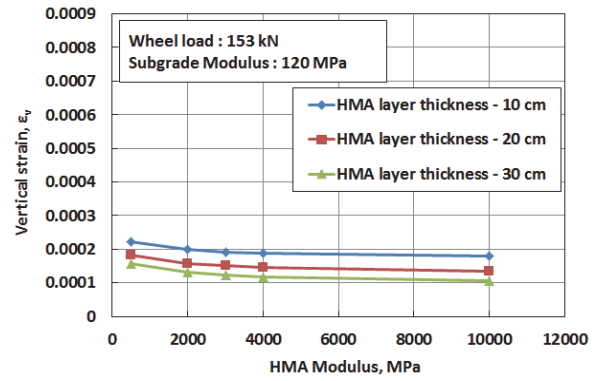
3.1.2 흙노반 상면에서의 수직변형률 결과

Fig. 3은 흙노반 상면에서의 수직변형률 발생추세를 나타낸 것이다. 동일 운중조건($P_s=153$ kN)에서 강화노반 탄성계수(E_{SB})가 같을 때 흙노반 강성이 증가하게 되면 아스팔트 탄성계수(E_{ASP})와는 무관하게, 수직변형률의 특성차가 아스팔트 노반 두께(t_{ASP})의 영향을 거의 받지 않는 경향이 확인되었다. 또한 아스팔트 동탄성계수(E_{ASP}) 값이 2,000MPa 이상이 되면 흙노반 상면에서의 수직변형률 감소 추이는 완만해진다.

아스팔트 동탄성계수의 크기가 2,000MPa 이하로 되는 경우에 흙노반 상면에서의 수직변형률(ϵ_v)이 증가하게 되나 그 크기는 크지 않으며, 흙노반 탄성계수가 증가 하게 되면 아스팔트 탄성계수에 의한 차이 또한 줄어들게 된다. 따라서 직결 아스팔트 노반두께 결정을 위한 설계기준을 수립할 경우 가장 민감도가 큰 흙노반 탄성계수(E_{SG})의 최소크기를 결정할 필요가 있다. 흙노반층 상면에서의 수직변형률의 발생 크기에 미치는 아스팔트 동탄성계수(E_{ASP})는 흙노반 탄성계수의 크기와 무관하게 대부분 $E_{ASP} = 2,000$ MPa을 기점으로 그 이상값에서 완만해지는 경향을 보였으며 2,000MPa이하 영역에서는 수직변형률이 증가하는 경향을 공통적으로 보였다.



(a) Subgrade Modulus : 80MPa



(b) Subgrade Modulus : 120MPa

Fig. 3 Compute vertical stresses at the top of subgrade

3.2 직결 아스팔트 궤도 노반의 설계수명 예측

3.2.1 아스팔트 노반 피로파괴에 대한 설계수명 예측

Fig. 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 운중이 153kN(고속철도), 연간통과톤수 40MGT일 때(교통량이 많을 경우) 흙노반 탄성계수 50MPa의 경우 모든 아스팔트 노반 두께(10, 20, 30cm)에서 목표 설계수명(50년)에 만족하지 못하였고, 흙노반 80MPa이상, 아스팔트 노반 30cm이상 궤도 조합 일 때 목표 설계수명(50년)을 만족 하였다. 다만, 아스팔트노반 두께가 얇을수록 설계수명은 짧아지며 아스팔트노반 두께가 두꺼울수록 흙노반 탄성계수차에 의한 설계수명의 차이가 점점 커지는 경향을 보였다. 설계목적상 운중 153kN(고속철도), 연간통과톤수 40MGT에 대해서는 흙노반 탄성계수가 80MPa이상, 강화노반 탄성계수 120MPa이상에 강화노반 두께 40cm 및 아스팔트 노반두께 30cm이상의 조합이면 아스팔트 노반의 피로파괴에 대한 충분한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

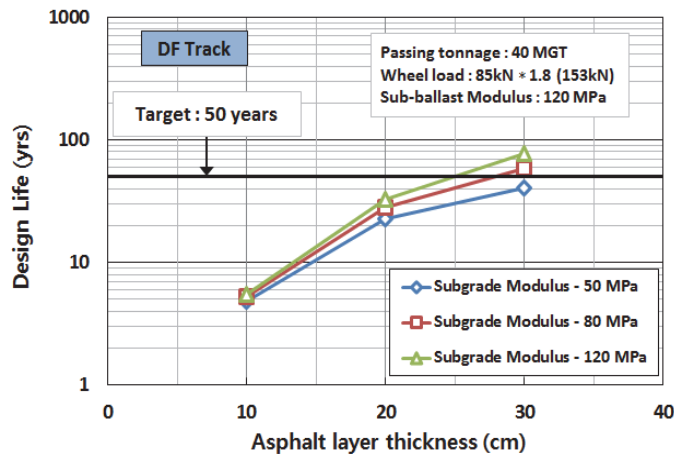


Fig. 4 Design life~asphalt thickness relation adapted for fatigue of subgrade

3.2.2 흙노반 영구변형에 대한 설계수명 예측

윤중이 153kN인 경우에 흙노반의 수직압축소성변형에 대한 아스팔트 노반 두께와 흙노반 탄성계수 사이의 상대적인 조합에 따른 안정성 확보여부가 분명하게 확인되었다. Fig. 5에서 확인할 수 있는 바와 같이 연간통과톤수 40MGT일 때(교통량이 많을 경우) 흙노반 탄성계수가 80MPa이상, 강화노반 탄성계수 120MPa이상에 강화노반 두께 40cm 및 아스팔트 노반두께 33cm이상의 조합이 되어야 아스팔트 노반의 수직압축소성변형에 대한 충분한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

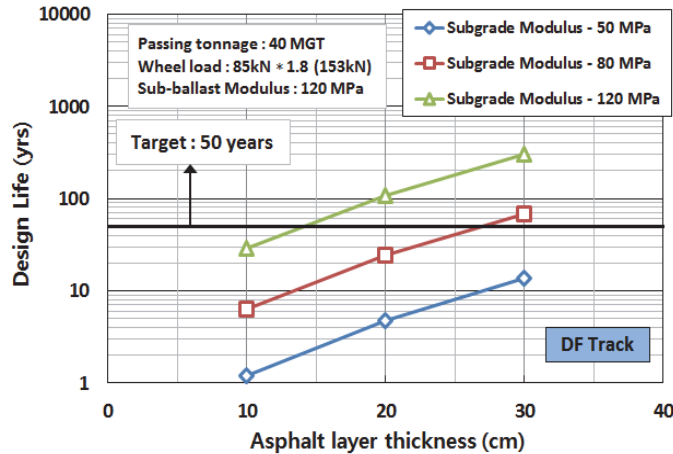
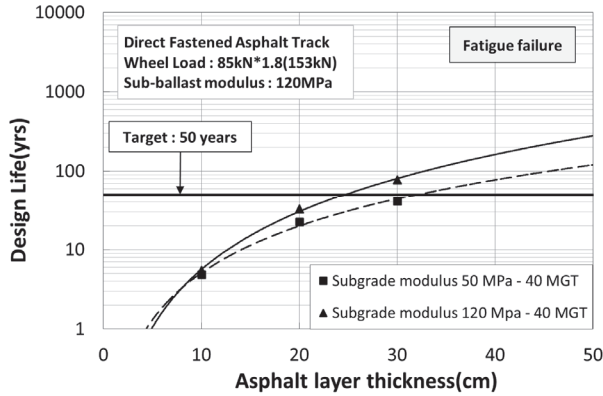


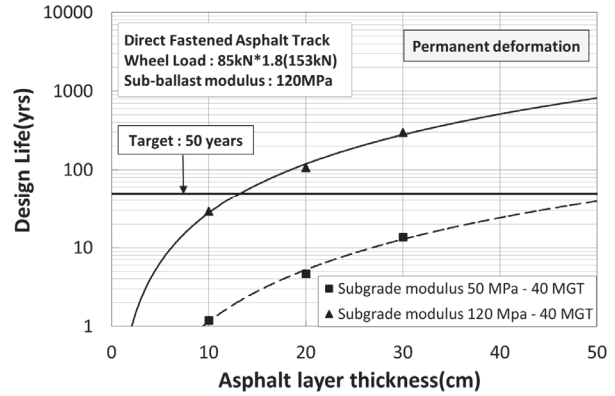
Fig. 5 Design life~asphalt thickness relation adapted for permanent deformation of subgrade

3.3 설계수명 결정 차트 개발

직결 아스팔트궤도의 윤중, 연간통과톤수(MGT), 궤도구조(강화노반 두께 및 탄성계수, 흙노반 탄성계수) 변화에 따른 설계수명에 대한 분석결과를 종합하여 이와 같은 설계파라미터사이의 상관관계를 보다 명확하게 파악할 수 있도록 하나의 설계차트로 재구성하였다. 재구성하는 방법은 직결 아스팔트 노반궤도 형식으로 윤중은 153kN으로 결정한 후, 강화노반 탄성계수 (E_{SUB}), 흙노반 탄성계수(E_{SG}), 연간통과톤수(MGT)를 고려하여 설계자가 적정 강화노반두께(t_{SUB}) 나 아스팔트 노반두께(t_{ASP})를 선택하여 해당 설계파라미터의 조합(궤도구조형식, P, E_{SB} , E_{SG} , MGT, t_{ASP} , t_{SUB})이 목표 설계수명(예: 50년)을 만족할 수 있는지의 여부를 판단할 수 있도록 하는 것이다. Fig. 6은 아스팔트 노반의 피로파괴 및 흙노반의 영구변형을 고려한 설계차트이다. 또한 향후 철도 차량에 따른 윤중(P) 및 교통량에 따른 연간통과톤수(MGT), 하부지반 재료 및 시공 특성을 반영한 강화노반 탄성계수(E_{SUB})를 추가하여 철도의 사용환경에 따른 설계차트를 세분화할 예정이다.



(a) 피로파괴를 고려한 설계차트



(b) 영구변형을 고려한 설계차트

Fig. 6 Proposed design chart for computing design life (Asphalt slab track, wheel load =153kN, E_{sub} = 120MPa)

4. 결론

본 연구에서는 직결 아스팔트 노반의 최적 설계차트를 개발하기 위하여 주요한 설계파라미터인 열차 하중(윤중) 및 속도, 연간통과톤수(MGT), 재료 물성(흙노반 및 강화노반 탄성계수), 각 층구조별 두께(강화노반 및 아스팔트 노반) 등의 항목을 먼저 설정하였다. 설정된 설계파라미터(항목)의 조합을 달리하여 아스팔트 노반 하면에서의 인장변형률 및 흙노반 상면에서의 수직변형률을 3D 유한요소해석에 의한 구조해석을 통해 분석하였다. 구조해석으로부터 계산된 아스팔트 노반 하면에서의 인장변형률과 흙노반 상면에서의 수직변형률 및 기존 아스팔트 도로포장을 위하여 사용되고 있는 파괴기준식(아스팔트의 피로파괴 및 흙노반의 수직압축소성변형)을 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), 하부지반 재료 및 시공특성을 반영한 강화노반 탄성계수(E_{SUB})를 추가하여 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.