철도 노반 설계를 위한 아스팔트 혼합물의 영구변형 특성 분석

Analysis of Permanent Deformations in Asphalt Mixtures for Design of Asphalt Trackbed Foundation

임유진* · 이진욱 · 이성혁 · 이병식

Yujin Lim · JinWook Lee · SeongHyeok Lee · ByeongSik Lee

Abstract In this study, permanent deformation of asphalt trackbed was investigated by performing repetitive load test on specimen made with dense graded asphalt mixture that was specially prepared for asphalt trackbed foundation. The obtained test results were compared with those computed from the prediction model proposed by AASHTO 2002, called MEPDG. No prediction model adaptable only for permanent deformation of the asphalt trackbed foundation has yet been developed, so the prediction model by AASHTO was adapted in this study to simulate permanent deformation of trackbed foundations in asphalt slab track and in ballasted asphalt track. In order to simulate permanent deformation, a finite element analysis was performed to obtain stresses generated in trackbed due to wheel load. It was found that the predicted permanent deformation was much smaller than the anticipated deformation and that the asphalt track could be stable during the service life of the structure.

Keywords : Asphalt trackbed, Permanent deformation, Triaxial compressive repeated loading test, Finite element analysis, Trackbed design

초 록 본 연구에서는 아스팔트 궤도구조개발을 목적으로, 노반용으로 배합설계된 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물 시편을 제작한 다음 영구변형시험을 통해 영구변형 발생특성을 분석하였다. 영구변형시험결과와 AASHTO 2002 및 한국형 포장설계법(KPRP)에서 제시한 영구변형 예측식과 비교, 분석하였다. 현재까지 노반용 혼합물을 위한 영구변형 예측식이 개발된 바 없으므로 AASHTO 제안식을 이용하여 직결 및 유도상 아스팔트 궤도의 부설 시 발생 가능한 영구변형량을 추정하였다. 이를 위해 유한요소해석을 실시, 궤도 깊이에 별 발생응력을 산출한 후 공용중 발생 가능한 영구변형량을 계산할 수 있었다. 예측된 소성침하량은 극미하여, 공용중 침하에 대한 내구성 확보가 가능한 것으로 판단되었다.

주요어 : 아스팔트 노반, 영구변형, 반복삼축압축시험, 유한요소해석, 노반설계

1. 서 론

철도노반을 포함한 궤도구조는 빈번하게 운행되는 중량의 철도차량을 안전하게 지지하고 열차의 통과하중을 하부지반으로 분산, 전달하는 역할을 감당하며 궤도의 파손, 틀림 등 궤도의 안정성에 직접적인 영향을 주기 때문에 열차의 주행 안정성에 직결되는 매우 중요한 부분이다. 특히 최근의 철도 고속화 추이로 인한 궤도틀림의 진행 빈발과 수송량의 증대 및 열차 통과횟수의 증가는 강화된 노반 설계기준의 수립을 요구한다.

반면에, 분진, 자갈이완 및 부등침하 등을 유발하여 과다한 유지보수 비용 및 기술 인력이 요구되는 자갈도상 궤도나 장시간의 공사기간과 높은 건설비가 필요하고 진동·소음 등을 유발하는 콘크리트 궤도구조와는 다른 궤도구조와

재료를 사용하여 기술인력 부족을 해결하고 고속화에 따른 유지보수기간 및 진동의 저감을 목표로 하는 새로운 생력화 궤도 기술의 개발과 도입이 필요한 시점이다.

따라서 본 연구에서는 자갈도상 궤도와 콘크리트 궤도구조의 단점을 극복할 수 있는 아스팔트 궤도 구조의 개발을 최종 목적으로 하여, 국내에서는 현재까지 확보되지 않은 아스팔트 궤도 구조의 개발에 필요한 아스팔트 혼합물의 기본 물성을 밝히고 역학적 특성을 규명하며, 소요의 설계입력 값으로 사용할 수 있는 설계입력 요소를 확정하는 것을 기본 목표로 설정하였다. 이러한 연구목표를 구체적으로 실행하기 위하여 먼저 아스팔트 궤도개발에 필요한 소요의 시험항목 및 설계 검토항목으로서 영구변형을 설정하여 이에 대한 소요의 시험을 실시하였다. 시험결과를 바탕으로 아스팔트 궤도에서 발생할 수 있는 영구변형량을 예측하고 개발된 밀입도 아스팔트 노반이 영구변형에 대한 충분한 저항성을 갖고 있는지를 검토하는 것을 본 연구의 목표로 설정하였다.

궤도하부구조는 재하횟수가 증가하면서 일정 반복재하횟수에서 급격히 영구변형이 증가하는 특성을 가지고 있으며,

*Corresponding author.

Tel.: +82-42-520-5402, E-mail : yujin@pcu.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2014

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.2.123

Fig. 1 Typical asphalt trackbed foundation: (a) ballasted asphalt trackbed, (b) asphalt slab trackbed

이는 케도틀림의 한 원인으로 지목되고 있다. 따라서 반복 재하 횟수의 증가에 따른 영구변형의 발생특성은 서로 밀접하게 연관되며 운중의 크기 및 케도 하부구조내 발생하는 응력의 크기와 재료의 변형계수 특성 등을 고려한 영구변형 예측모델의 개발은 매우 시급한 과제이다.

영구변형을 예측하기 위한 모델개발이 여러 연구자에 의해 시도된 바 있다[1-4]. 특히 Monismith [5]에 의해 제안된 Power모델은 재료의 영구 변형률(ϵ_p)과 반복재하횟수(N)와의 관계를 식 (1)과 같이 단순한 형태로 표현한다.

$$\epsilon_p = A \cdot N^b \quad (1)$$

여기서, ϵ_p = 누적영구변형률, A , b = 모델계수, N = 반복재하횟수

본 연구에서는 아스팔트 노반설계법의 주요 공용성 검토 대상이면서 동시에 설계입력요소가 되는 영구변형 예측모델 수립을 위하여 먼저 철도용 아스팔트 노반 혼합물의 잠정 배합설계를 바탕으로 제작된 혼합물 시편에 대하여 마찰 안정도, 간접인장강도시험 등의 기본 역학시험을 실시하여 소요 역학특성을 검토하였다. 역학적 기본 요구특성이 만족된 시편을 대상으로 반복삼축압축시험을 실시하여 영구변형 발생 특성을 분석하였다.

현재까지 아스팔트 노반만을 위한 독자적 영구변형 예측 모델이 개발된 바 없다. 이를 고려하여 도로포장분야에서 아스팔트 포장체의 영구변형 예측을 위하여 개발된 바 있는 AASHTO 2002 MEPDG [6] 및 한국형 포장설계법[7] 영구 변형 예측식 모델을 차용하여 계산된 영구변형 예측결과와 반복삼축시험으로부터 측정, 획득한 영구변형결과를 비교, 검토하여 노반용 밀입도 아스팔트 혼합물의 영구변형 발생 특성을 검토하였다. 이를 위하여 아스팔트 노반을 사용한 가상의 케도구조체에 대한 3D 유한요소 해석을 실시하였으며 아스팔트 케도(유도상 및 직결 아스팔트 케도, Fig. 1 참조)의 예상 깊이별 영구변형률 발생패턴을 온도 대역별로 산출하여 실 아스팔트 노반상에 발생할 수 있는 영구변형의 발생크기를 예상하였다.

2. 노반용 아스팔트 혼합물의 영구변형 예측모델

2.1 아스팔트 혼합물의 영구변형 예측모델

아스팔트 혼합물로 구성된 층의 공용성을 평가하기 위해

서는 예상 영구변형을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 영구 변형은 아스팔트 혼합물의 파손 또는 혼합물내의 골재의 움직임 등에 의해 발생하는 회복 불가능한 변형을 의미한다. 영구변형에 영향을 미치는 인자에는 크게 아스팔트 바인더의 종류, 골재, 아스팔트 혼합물의 구성특성, 온도, 하중특성, 하중주파수 및 기타 현장조건 등이 있다. 이러한 영구 변형은 일반적으로 압착(densification)이나 일방향 압축(compression)과 전단 그리고 차량하중으로 인한 측방유동이나 재료의 소성유동의 결과로 발생하는 것으로 알려져 있다. 삼축압축시험의 전형적인 누적소성변형률(ϵ_p)과 반복재하 횟수(N) 사이의 관계는 Fig. 2와 같다. 2단계 발생단계까지는 압착 또는 압밀에 의한 변형이 주로 발생하며 3단계(tertiary)에 이르면 전단에 의한 변형이 지배적이 된다.

식 (1)과 같은 Power모델로 표현되는 소성변형 예측식은 아스팔트 포장의 반복재하조건을 비교적 잘 모사함에도 불구하고 매개변수 A , b 의 영향을 분석하고 평가하기 어려운 단점이 있다. 이러한 소성변형 인자는 온도와 하중 및 공극률에 대한 함수로 나타낼 수 있으며 이러한 조건을 포함하여 실내시험, 포장가속시험, 현장계측시험 등의 시험을 실시할 경우 영구변형 모델을 개발할 수 있다. 일반적인 영구변형 모델은 식 (2)와 같이 온도, 재하회수, 응력 및 공극률 등의 함수로 표현되며 AASHTO 2002 MEPDG(Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide)에서는 식 (3)과 같은 형태의 가열아스팔트 혼합물(HMA)층에 적용하는 영구변형 모델 기본형을 제시하였다.

$$\epsilon_p = a(T, \sigma, V_a) N^{b(T, \sigma, V_a)} \quad (2)$$

여기서, ϵ_p = N 번째 재하횟수에서의 누적 영구변형률, N = 하

Fig. 2 ϵ_p - N typical relationship

Table 1 Model parameters for different mixtures

Aggregate	Binder	Coefficients			
		A	B	C	D
DGA 19mm	PG 58-22	0.188558826	1.035918777	0.837909281	0.091072086
	PG 64-22	0.168558826	1.035918777	0.837909281	0.071072086
	PG 76-22	0.300288723	0.132505211	0.418683015	1.534267137

중반복횟수, T = 온도($^{\circ}\text{C}$), σ = 재하응력, V_a = 공극률(%)

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = a_1 T^{a_2} N^{a_3} \quad (3)$$

여기서, ε_p = 회복탄성변형률, a_1, a_2, a_3 = 비선형 회귀분석에 의해 결정되는 계수. Power 모델 외에 다양한 아스팔트 포장층의 영구변형 예측모델이 개발된 바 있다[8]. AASHTO 2002 설계법에서 채용한 영구변형 예측식의 완성형은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = 10^{-3.15552T^{1.734}N^{-0.39937}} \quad (4)$$

한국형 도로포장 설계법(KPRP)에서는 아스팔트 혼합물 층의 영구변형 결정을 위해 예측 또는 시험으로부터 평가된 동탄성계수(E^*)와 포장구조특성을 고려한 구조해석 모형 등이 필요하다. 이때, 하중크기 및 조합에 따라 회복탄성변형률(ε_r)이 구조해석 모형에 의하여 결정된다. 회복탄성변형률은 주로 다층탄성해석 또는 유한요소해석에 의해 결정할 수 있다. 식 (5)는 KPRP에서 제시된 영구변형 모형으로서, 혼합물별 예측공식상의 계수(A, B, C, D) 중 본 연구에서 사용한 밀입도 혼합물(DGA 19mm)에 대한 것은 Table 1과 같다.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = 10^{DN^AT^BV_a^C} \quad (5)$$

KPRP 예측식은 AASHTO식에 비하여 공극률의 영향을 추가로 고려하도록 한 차이점이 있다.

2.2 아스팔트층의 깊이 효과를 고려한 영구변형 예측모델

AASHTO 2002 MEPDG 영구변형 예측모델은 온도 및 반복재하횟수의 영향 등을 효과적으로 고려할 수 있지만, 현장의 요건을 반영할 수 있도록 현장보정계수(shift factor) β 를 도입할 필요가 있으며 이 경우 식 (3)은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \beta_1 a_1 T^{\beta_2 a_2} N^{\beta_3 a_3} \quad (6)$$

식 (6)의 모델은 Leahy[9]에 의해 제시된 것이다. 모델의 정확도를 높이기 위하여 관측자료를 활용, 깊이 보정계수(Depth parameter) k_1 를 포함한 최종 예측식은 다음과 같이 제시되었다.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 \times 10^{-3.4488T^{1.5606}N^{0.479244}} \quad (7)$$

여기서, $k_1 = 0.328196\text{depth}(C_1 + C_2\text{depth})$, depth = 영구변형률 산정위치까지의 깊이(inch). 깊이보정계수 k_1 의 상관계수 C_1, C_2 는 각각 다음 식으로 구한다.

$$C_1 = 0.1039h_{ac}^2 + 2.4868h_{ac} - 17.342 \quad (8)$$

$$C_2 = 0.0172h_{ac}^2 - 1.7331h_{ac} + 27.428 \quad (9)$$

여기서, h_{ac} = 아스팔트층의 총 두께(inch)

회복탄성변형률은 식 (10)과 같이 아스팔트 동탄성계수(E^*)와 Hooke의 법칙을 사용하여 결정한다. 식에 사용되는 동탄성계수는 혼합물의 재료특성, 온도 및 하중 주파수의 함수이다.

$$\varepsilon_{rz} = \frac{1}{E^*}(\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad (10)$$

여기서, ε_{rz} = 수직방향 회복탄성변형률, E^* = 아스팔트 동탄성계수, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = 혼합물층 x, y, z 방향의 응력, ν = 아스팔트 포아송비

회복탄성변형률이 결정되면 식 (7)로부터 영구변형률이 계산되며 각 층의 영구변형량은 다음 식을 이용하여 결정할 수 있다.

$$RD = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{p-i} \times \Delta h) \quad (11)$$

여기서, RD = 영구변형량(inch or mm), i = 아스팔트 층 번호, n = 아스팔트층의 총 개수, ε_{p-i} = 누적영구변형률, Δh = 각층의 아스팔트층 두께(inch or mm)

3. 노반용 아스팔트 혼합물의 역학적 특성 시험

3.1 아스팔트 혼합물의 재료구성 및 역학시험

노반용 아스팔트 혼합물 사용 재료로 AP-5(침입도 Pen. 60~80, PG 64-22)를 기본바인더로 사용하였다. 골재는 충남 금산군 복수면의 석산에서 생산된 화강변성암 재질이며 ‘가열 아스팔트 혼합물 배합설계 지침[10]’에서 규정한 국내 혼합골재의 입도기준 중, 표층용 밀입도 19mm혼합물 배합에 사용하도록 제시된 WC-4(20F) 골재입도를 모두 만족하는 범

Fig. 3 Mechanical test results of asphalt mixtures made for trackbed foundation

위 내에서 결정하였다. 아스팔트 혼합물은 WC-4(19mm 밀입도) 국내 규정을 적용하여 제작하였으며 제작된 시편의 크기는 직경 100mm, 높이 75mm이었다. 시편의 제작을 위해 마샬 다짐시험기(Marshall compaction test) 및 선회다짐시험기(Gyratory compaction test)를 사용하였다.

마샬 안정도 실험은 KS F 2337에 따라 실시하였으며 2개의 반원형 재하헤드를 통하여 직경 101.7mm인 원통형 공시체 5개를 60°C의 온도에서 50mm/min의 속도로 공시체가 파괴될 때까지 압축 하중을 가하여 마샬 안정도와 흐름치를 측정하였다. 간접인장시험은 마샬 안정도 시험과 같은 공시체 및 하중재하 속도를 사용하여 동일 시편개수에 대해, 25°C의 온도로 시험하였다. 시험 결과는 Fig. 3과 같이 도로포장 밀입도 혼합물(WC-4) 기준을 모두 만족하는 것으로 판단되었다. 마샬 안정도의 아스팔트 노반용 혼합물 기준치는 국내 기준치(750kgf)[10], 독일 RailOne[11]에서 제시한 값(8kN=800kgf) 및 일본[12]에서 제시하여 사용하는 기준치(500kgf)보다 크게 평가되었다. 따라서 단순 비교시 본 연구에서 배합설계하여 제작된 혼합물(WC-4(19mm 밀입도))은 노반용으로 사용 가능한 것으로 판단되었다. 또한 잔류인장강도(TSR: Tensile Strength Ratio)는 75%이상 확보되었다.

3.2 영구변형 시험 결과와 예측결과의 비교 분석

아스팔트 궤도노반용 혼합물에 대한 영구변형시험을 위해 이태리 MATEST사의 선회다짐장비를 이용하여 시편을 제작하였다. 영구변형 시험용 시편은 직경 150mm, 높이 180mm의 원통형 시편을 선회다짐기로 제작한 다음 코어링 장비를 이용하여 직경 70mm로 코어링 하였고, 상부 및 하부를 각 35mm씩 절단하여 높이 100mm의 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 25°C의 항온챔버에서 24시간 건조시켜 수분을 제거하였다. 시험에 사용된 장비는 국내에서 개발한 삼축반복시험기(Cyclic Triaxial Test System)로서 호주 IPC타입의 모사제품이다. 온도조절용 챔버(항온조)를 통해 시험시편에 대한 항온상태에서의 재하시험이 가능하다(Fig. 4(a)). 데이터

(a)

Fig. 4 Permanent deformation test: (a) test machine and (b) test results

를 수집하기 위한 CDAS(Control and Data Acquisition System)와 유압장치 및 재하장치 등으로 구성되어 있다. 하중은 NCHRP Report 465[13]에 소개된 반복삼축압축시험

(Triaxial Repeated Load Permanent Deformation Tests) 방법을 이용하여 Haversine파를 사용하였다. 0.1초의 재하기와 0.9초의 휴지기를 갖도록 하여 반복횟수 70,000회 이상 재하하였다. 각 설정온도(30°C, 45°C, 60°C)에서 구속압 138kPa, 축응력 370kPa로 반복재하하였다. 또한, 변위측정은 시험셀

Fig. 5 Comparisons of permanent deformations predicted by AASHTO, KPRP, and test results

상부에 1/10,000(mm)의 정밀도를 가지는 선형변위계(LVDT)를 설치하여 1초당 10개의 DATA를 획득하였다.

시험 결과 Fig. 4(b)와 같이, 30°C, 45°C에서는 50,000회 이상 시험이 진행되어도 영구변형률의 안정된 값(수직영구 변형률: 30°C=0.5%, 45°C=0.1%)을 유지하며 압착(densification)에 의한 변형만 관찰할 수 있었다. 온도 60°C에서는 흐름점(flow point)이 분명히 확인되었으며 그 이하의 온도에서는 재하회수 70,000회까지 흐름점이 확인되지 않았다.

Fig. 5는 AASHTO 2002 및 한국형 포장설계법(KPRP)에서 각각 제시한 영구변형 예측모델과 본 연구에서 시행한 밀입도 19mm 혼합물 시편($V_a=3\%$)에 대한 반복삼축압축시험으로부터 획득한 영구변형시험결과를 비교한 것이다. AASHTO 2002 및 KPRP 예측결과가 시험결과에 비하여 모두 크게 평가되는 것을 알 수 있었으며 이 중 AASHTO 2002예측결과는 대단히 크게 산출되는 경향을 보였다. 보수적인 결과를 산출하는 예측식의 특성을 고려하더라도 매우 과도한 것으로 볼 수 있으며 이러한 과도발생 경향은 이미 여러 연구자에 의해 지적된 바 있다[1-4].

3.3 수치해석을 이용한 응력조건 산정 및 깊이 효과를 고려한 영구변형 예측

궤도하부층에 발생하는 응력산정을 위하여 아스팔트 궤도에 대한 구조해석을 실시하였으며 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS를 사용하였다. 3차원 유한요소 해석을 위해 사용한 유한요소망의 구성은 Fig. 6과 같다.

궤도의 정밀한 해석이 목적이 아니라 아스팔트 노반층에 작용하는 각 방향 응력 값만을 산출하기 위한 것이므로 윤하중의 미치는 범위를 고려하여 실제 궤도보다 적은 침목 5개만을 해석대상으로 삼았으며, 흙 노반은 원지반 없이 상부 노반만을 모델링 하였다. 궤도의 표준단면은 경부고속철도 1단계 구간을 참고하였다. 각 부재 및 궤도구성 요소별 사용재료의 재료 입력물성은 Table 2와 같다. 작용하중은 설계속도를 고려하여 동적계수(DAF)에 의해 레일당 윤중 157kN으로 결정하였으며 모든 궤도 구성층은 선형 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 또한 해석대상 궤도를 유도상 궤도 및 아스팔트 직결궤도로 구별하여 해석을 수행하였다. 레일은 beam, 패드는 Spring, 침목 및 노반은 각각 Solid 요소로 설정하였다. 유도상 궤도는 자갈도상과 쇄석 강화노반 사이에 아스팔트 층을 5cm 두께로 고정하였고, 아스팔트 직결궤도는 콘크리트 슬래브 하면에 표층 5cm, 기층 25cm로 총 두께 30cm 두께의 아스팔트 층으로 모델링 하였다. 탄성체로 가정한 유한요소 해석으로부터 아스팔트 영구변형 예측을 위해 사용할 아스팔트 노반층 내의 응력조건을 가운데 침목 하중 직하부의 아스팔트 노반층 중심위치에

Table 2 Input material values for finite element analysis of full 3D asphalt track model

Element		Rail	Pad	Sleeper	Ballast	Asphalt	Rein forced soil	Sub grade
ρ (ton/m ³)		7.8	-	2.3	2.0	2.3	2.0	2.0
Elastic model	E	210GPa	40kN/mm	29.1GPa	100MPa	3GPa	180MPa	125MPa
	ν	0.3	-	0.2	0.2	0.35	0.2	0.3

(a) Modeling of ballasted asphalt track and finite element mesh

(b) Modeling of asphalt slab track and finite element mesh

Fig. 6 Modeling of asphalt track and 3D finite element mesh

Table 3 Calculated stresses in the center of asphalt layer from ABAQUS FEA

Division	Asphalt slab track (kPa)			Ballasted asphalt track (kPa)		
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
Stress Results	17.80	14.30	235.60	15.11	14.48	74.10

Table 4 Utilized temperature and Young's modulus according to Hooke's law

Division	Temperature(°C)		
	30	45	60
Young's modulus	2 GPa	1 GPa	0.8 GPa

서 구하였다. 획득된 응력은 Table 3과 같다.

식 (8)을 이용하여 회복탄성변형률(ϵ_{rz}) 계산시 사용한 온도(T) 및 대표 동탄성계수(E^*)는 다음과 같다.

다음 Fig. 7은 AASHTO 2002 MEPDG 영구변형 예측 모델식(7)과 아스팔트 궤도(유도상 궤도 및 직결아스팔트궤도)에 대한 3D 유한요소 구조해석으로 구한 응력계산결과를 활용하여 획득한 영구변형률 예측결과를 반복삼축시험으로부터 획득한 영구변형률 측정결과와 비교한 것이다. 각 온도 대역별로 비교한 결과, 상온(20°C)보다 다소 높은 30°C에서의 반복삼축시험을 통해 얻어진 영구변형률 측정값의 경우, 초기에는 시험 값에 비하여 다소 작은 결과를 보였으나 반복재하횟수가 증가할수록 매우 비슷한 값을 도출하는 것을 확인하였다. 그러나 60°C의 경우 반복삼축시험과는 달리 흐름점(Flow point)이 관측되지 않았으며 전단파괴에 의한 tertiary영역으로의 발전 현상은 발견되지 않았다. 실내시험의 경우 실제 혼합물이 받는 응력조건을 정확히 모사하지 못한 채로 단순 가정하여 적용하였으므로 직접 비교는 다소 무리가 있을 수 있으며 현장에서의 아스팔트 궤도에 대한 재하시험 및 실험형 가속시험(accelerating test) 등에 의해 AASHTO2002 MEPDG식은 충분히 보정하여 사용할 수 있

(a) Asphalt slab track: $N - \epsilon_p$ with temperature

(b) Ballasted asphalt track: $N - \epsilon_p$ with temperature

Fig. 7 Comparison of cumulative permanent strains predicted by AASHTO 2002 and test results

(a) Asphalt slab track ϵ_p - depth variation @ 30°C

(b) Asphalt slab track ϵ_p - depth variation @ 45°C

(c) Asphalt slab track ϵ_p - depth variation @ 60°C

(d) Ballasted asphalt track ϵ_p - depth variation with Temp.

Fig. 8 Comparison of cumulated permanent strain predicted by AASHTO 2002 and FEA Results with depth in asphalt layer

을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 깊이 효과를 고려한 AASHTO 2002 MEPDG 예측식으로 직결궤도 및 유도상 아스팔트 궤도의 예상 깊이별

영구변형을 발생 패턴을 온도별로 산출하여 비교한 것이다. 아스팔트 노반층 내 온도(30°C, 45°C, 60°C)가 설계수명 기간(각 20, 40, 60년) 동안 일정한 것으로 가정하였을 때 발

Table 5 Predicted maximum permanent deformation in an asphalt trackbed layer at a certain temperature level at the end of design life

Division	20 Years	40 Years	60 Years
30°C	0.269mm	0.825mm	1.442mm
45°C	0.375mm	1.151mm	2.011mm
60°C	0.456mm	1.398mm	2.441mm

생가능한 영구변형률의 깊이에 따른 분포를 확인할 수 있다. 이때 식 (11)을 이용하여 각 층을 소정의 두께로 나누고 산출된 영구변형률을 층두께에 곱하여 모두 더하면 Table 5와 같이 아스팔트 노반층에서 예상되는 영구변형량을 구할 수 있다. 이는 설계수명 전주기 동안 일정 온도가 지속되는 상황을 상정하여 계산된 결과로서 사계절의 온도변화와 일별 온도변화를 경험하는 노반층의 상황을 고려할 때 실제 상황과는 차이가 난다. 그러나 아스팔트 혼합물층의 온도가 60°C, 설계수명이 60년일지라도 전체 예상 영구변형량은 체결구 조정가능량인 5mm의 50% 정도인 2.45mm에 불과함을 알 수 있다.

3.4 대표온도별 동탄성계수 값을 이용한 설계수명별 영구변형량 산출

아스팔트 노반층의 경우 실제 국내 계절별(1계절=3개월) 대표 평균온도에 해당하는 동탄성계수 값을 설정(Table 6)하여 Fig. 6과 동일한 궤도모델에 대한 구조해석 목적의 ABAQUS 유한요소해석을 별도로 실시하였다.

Fig. 9는 깊이효과를 고려한 MEPDG 예측식을 이용하여 Table 6의 대표온도별로 아스팔트 직결궤도의 아스팔트 노반층 예상깊이별 영구변형률 발생패턴을 재산출한 것으로서, 계절별 동탄성계수변화 효과를 3.3절에서 선정한 설계수명(20, 40, 60년)에 반영하고 이를 설계 수명별로 계산하여 비교한 것이다. 식 (11)을 이용하여 앞서 설명한 바와 마찬가지로의 계산절차를 따랐다. 이와 같은 영구변형량 산출을 위해서는 아스팔트 노반층의 계절별 대표 동탄성계수와 설계수명에 해당하는 반복재하횟수(N)를 먼저 산출하여야 한다.

영구변형량 결정요소로서 (1)각 계절별 아스팔트 혼합물의 동탄성계수와 (2)흙노반의 탄성계수, (3)윤증, (4)년간통과톤수(MGT) 및 (5)재하횟수(N) 등이 반영된다. 현재 직결 아스팔트궤도의 허용침하량에 대한 기준이 설정되어 있지 않

Table 6 Seasonal representative temperature levels and corresponding dynamic moduli

Season	Dynamic elastic modulus(GPa)	Temperature(°C)
Spring	6	15
Summer	1.2	40
Fall	4	20
Winter	12	0

으므로 설정 통과톤수(MGT)에 해당하는 반복재하횟수에 따른 영구변형량만 단순산출하여 비교하도록 하였다. 본 연구의 반복재하횟수(N)는 1대차(bogie)당 2축의 총 4륜에 의한 재하중이 1회의 1대차 통과로 간주되었다. 식 (12)를 이용하였으며, 20, 40, 60년에 대하여 각각 $N=3,267,973$ 회, 6,536,974회, 9,803,921회로 산정되었다.

(a) Permanent strain for 20 years

(b) Permanent strain for 40 years

(c) Permanent deformation for 60 years

Fig. 9 Expected cumulated permanent strain variation with depth of asphalt trackbed according to representative dynamic modulus

$$N = \frac{MGT \times (20, 40, 60 \text{ Years}) \times (10 \text{ kN/ton})}{4 \times P} \quad (12)$$

여기서, MGT = 년간통과톤수(1,000,000ton), P = 윤중(KTX = 153kN)

따라서, 계절별 대표 동탄성계수와 산출된 총통과톤수에 해당하는 반복재하회수를 이용하면 계절별 누적영구변형량을 구할 수 있고 이를 모두 더하면 전체 영구변형량(Rutting depth: RD)을 구할 수 있으며 기준치 이내 여부를 판단하여 불만족시 케도노반 단면형상을 재구성 하여야 한다.

이와 같은 절차에 의해 산정된 최종 영구변형량은 설계 수명에 따라 각각 20년에 0.423174mm, 40년에 0.589991mm, 60년에 0.716435mm로 확인되었다. 따라서 비록 아스팔트 도로포장에 적용하기 위하여 개발된 깊이효과를 고려한 영구변형 예측모델을 적용하였으나, 설계수명에 따른 영구변형 예측량은 설계수명 60년에서도 1mm가 채 되지 않을 것으로 판단되었다.

다만, 직결케도 아스팔트 노반층상의 침목 하면 접지압(최대 약 450kPa)이 아스팔트 도로포장설계시 사용하는 타이어 접지압(680~720kPa)보다 작을 것이므로 예상 영구변형량(RD)은 위의 산출 값보다 더 작을 것으로 예상된다. 이와 같은 계산결과와 ATD 타입의 아스팔트 케도를 적용한 독일에서 최근 관측된 결과와 일치하는 것이다[15]. 또한 아스팔트 혼합물에 대한 영구변형 예측식은 도로포장에서 활용하기 위하여 개발된 것이지만 케도구조의 응력조건 및 케도구조층 내에서의 온도조건을 정확히 분석하여 약간의 수정을 가하면 아스팔트 케도구조에 적합한 영구변형 예측식을 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 수정 계수를 확정하기 위해서는 아스팔트 케도구조에서 환경조건에 따른 아스팔트 노반층에 이르는 온도구배 변화를 모델링하고 케도구조 형식별 응력 조건을 정확히 모사할 수 있어야 한다. 이러한 작업은 향후 본 연구에 지속적으로 수행할 예정이다.

3. 결 론

철도용 아스팔트노반 혼합물의 잠정 배합설계를 바탕으로 제작된 시편에 대하여 마찰 안정도, 간접인장강도 및 반복삼축시험에 의한 영구변형시험 등의 역학적 특성을 분석하고, 아스팔트 노반의 설계에 반영할 수 있는 다양한 영향인자를 평가하였다. 또한 영구변형 예측식의 적용성을 평가하기 위하여 3D 유한요소 해석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 아스팔트 노반용 밀입도 혼합물을 잠정 배합설계하였으며 마찰 및 간접인장강도 등 기본적인 역학적 특성값은 일본 및 독일 등의 노반용 혼합물의 기본 역학적 요구값을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 단순 비교 시 본 연구에서 배합설계하여 제작된 혼합물(WC-4(19mm 밀입도))은 노반용으로 사용 가능한 것으로 판단되었다.

(2) AASHTO 2002 및 KPRP에서 각각 제시한 영구변형 예측모델과 밀입도 19mm 혼합물 시편(공극률 $V_v=3\%$)에 대

한 반복 삼축압축시험으로부터 획득한 영구변형시험결과를 비교 및 분석하였다. 분석 결과 AASHTO 2002예측식은 KPRP 및 본 연구에서 시행한 반복시험결과에 비하여 매우 크게 평가되는 것을 알 수 있었으며 영구변형률 예상발생률은 KPRP 예측식 결과가 WC-4 혼합물에 대한 실험 결과와 유사한 것으로 판단되었다.

(3) AASHTO 2002 예측식 모델과 아스팔트 케도(유도상 및 직결케도)에 대한 3D 유한요소 구조해석으로 구한 응력계산결과를 활용하여 획득한 영구변형 예측결과와 본 연구에서 반복삼축시험으로부터 측정, 획득한 영구변형 측정 결과를 비교하여 보았다. 또한, 깊이효과를 고려한 AASHTO MEPDG예측식으로 직결 및 유도상 아스팔트 케도의 예상 깊이 별 설계수명에 따른 영구변형률 발생패턴을 온도별로 산출하여 분석하였다. 아스팔트 혼합물층의 온도가 60°C, 설계수명이 60년일지라도 전체 예상 소성변형량은 체결구 조정가능량인 5mm의 약 50%인 2.45mm에 불과함을 알 수 있었다. 케도하부 아스팔트 노반층이 받는 응력조건을 정확히 파악하여 영구변형 시험조건을 수립하고 이를 반영하여 영구변형 예측모델을 개발할 필요가 있다.

(4) 계절별 동탄성계수변화 효과를 전체 설계수명(20년, 40년, 60년)에 걸쳐 반영하고 이를 설계수명별로 산출한 후 깊이효과를 고려하여 아스팔트 직결케도의 아스팔트 노반층 예상 깊이별 영구변형률 발생패턴을 재산출하였다. 최종 영구변형량(ΣRD)은 설계수명에 따라 각각 0.423174mm(20년), 0.58991mm(40년), 0.716435mm(60년)으로 확인되었다. 따라서, 비록 아스팔트 도로포장에 적용하기 위해 개발된 깊이효과를 고려한 영구변형예측모델을 적용하였으나, 설계수명에 따른 영구변형 예측량은 설계수명 60년에서도 1mm가 채 되지 않을 것으로 예상되었다. 침목 하면 직결케도 아스팔트 노반층의 접지압(약 450kPa)이 아스팔트 도로포장설계시 사용하는 타이어 접지압(680kPa)보다 작을 것이므로 예상 영구변형량(RD)은 예측한 값보다는 더 작을 것으로 추정되었다. 이와 같은 계산결과와 ATD 타입의 아스팔트 케도를 적용한 독일에서 최근 관측된 결과와 일치하는 것이다[15].

(5) 아스팔트 혼합물에 대한 영구변형 예측식은 도로포장에서 활용하기 위하여 개발된 것이지만 케도구조의 응력조건 및 케도구조의 층내에서의 온도조건을 정확히 분석하여 약간의 수정을 가하면 아스팔트 케도구조에 적합한 영구변형 예측식을 개발할 수 있을 것으로 판단되었다. 이러한 수정계수를 확정하기 위해서는 아스팔트 케도구조에서 환경조건에 따른 아스팔트 노반층에 이르는 온도구배 변화를 모델링하고 케도구조 형식별 응력조건을 정확히 모사할 수 있어야 한다. 이러한 작업은 향후 본 연구에 지속적으로 수행되어야 할 과업으로 판단된다.

후 기

이 논문은 한국철도기술연구원 “철도건설 및 운용비 절감을 위한 경제성 향상 기술개발”(·고속화에 대응한 철도 아스팔트 노반 및 케도구조 개발-)과제 및 2013년도 정부(교

육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NO.: 2012R1A1A4A01009639)의 성과물로서 양 기관의 지원에 감사드립니다.

References

- [1] D. Li, E.T. Selig (1998) Method for railroad track foundation design. I: development, *J. Geotech. Geoen. Eng.*, ASCE, 124(4), pp. 316-322.
- [2] UIC (1994) *Earthworks and track-bed layers for railway lines. UIC Code 719R*, International Union of Railways, Paris, France.
- [3] D.L. Heath, M.J. Shenton, R.W. Sparrow, J.M. Waters (1972) Design of conventional rail track foundations, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 51, pp. 251-267.
- [4] E.C. Shin, H.S. Yang, C.Y. Choi (2008) Estimation of Reinforced Roadbed Thickness based on Experimental Equation, *Proc. 2008 Spring conf. Korean Society for Railways*, Daegu, pp. 1734-1742.
- [5] C.L. Monismith, N. Ogawa, C.R. Freeme (1975) Permanent Deformation Characteristics of Subgrade soils due to Repeated Loading, *Transportation Research Record*, Issue 537, pp. 1-17.
- [6] AASHTO (2002) 2002 Design Guide of New and Rehabilitated Pavement Structures, Research Report, National Cooperative Highway Research Program, USA.
- [7] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011) Development of Korean Pavement Design Method and Pavement Improvement Guideline, *Korea Pavement Research Program*.
- [8] K.H. Lee, J.Y. Jeon (2004) Permanent Deformation Characteristics of Hot Mix Asphalt by Various Creep Tests, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 24(2D), pp. 195-203.
- [9] R.B. Leahy (1989) Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete, *PhD Thesis*, University of Maryland.
- [10] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2005) Hot mix asphalt design guidelines.
- [11] RailOne GmbH (2012) Asphalt Slab Track-GETRACKA1/A3-System description for KRRI.
- [12] RTRI (2007) Specifications in-Detail for Design of Rail Structures: Earth Structures.
- [13] K.E. Kaloush, M.W. Witczak (2002) Simple Performance test for Permanent Deformation of Asphalt Mixture, *Annual Transportation Research Board Meeting*.
- [14] B.S. Lee (2012) Analysis of Dynamic Modulus and Permanent Deformations in Asphalt Mixtures for Design of Asphalt Trackbed Foundation, *Master's Thesis*, Paichai University.
- [15] KRRI (2013) Technical Touring Report of German Asphalt Track System.

접수일(2013년 10월 11일), 수정일(2013년 12월 9일),
게재확정일(2014년 2월 24일)

Yujin Lim : yujin@pcu.ac.kr

Department of Civil and Railroad Engineering Paichai University,
155-40 Baejae-Ro, Seo-Gu, Daejeon, Korea

JinWook Lee : jinugi@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-Ro,
Uiwang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

SeungHyeok Lee : Shlee@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-Ro,
Uiwang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

ByeongSik Lee : bs1227@sedamenc.com

Formerly Paichai University, Sedam E&C, 4F Serim Bldg. 94,
Seongsui-Ro Seongdong-Gu, Seoul, Korea