

3D 수치해석에 의한 아스팔트 궤도의 소성변형 모델링 및 분석

Modeling and Analysis of Permanent Deformation in Asphalt Trackbed Foundation

송근우*, 이진욱**, 조호진*, 임유진*†

Geun-woo Song*, Jin-wook Lee**, Ho-jin Lee*, Yujin Lim*†

Abstract In this study, a modeling technique is developed using creep model found in ABAQUS library. The developed modeling technique is used to predict permanent deformation generated in asphalt trackbed foundation. Effect of several design parameters including thickness, wheel load and number of loading are considered and analyzed using the developed modeling technique of permanent deformation in finite element analysis on the behavior of full-size asphalt track section.

Keywords : Modeling, Permanent deformation, Creep model, Asphalt trackbed

초 록 궤도구조의 장기적인 공용성 확보를 위해 궤도틀림의 주요 발생원인이 되는 소성변형을 제어하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 실제 궤도 구조를 기하학적으로 3-D 모델링 하였으며, 장기적인 반복재하에 의한 누적 소성침하량을 분석하였다. 장기공용성 평가항목인 소성침하량 예측을 위하여 Creep model을 이용한 아스팔트 노반의 누적 소성변형 모델링 방법을 개발하였으며 궤도의 층구성차이, 두께(t), 하중(P) 및 반복재하횟수(N)에 따른 거동을 비교, 분석하였다. 분석시 흙노반상에서의 수직토압 및 ASP노반 하면에서의 인장변형을 발생 경향을 집중 조사하였다. 특히 Creep model 구현시 아스팔트 혼합물 재료가 갖는 온도 감온성을 고려, 계절에 따른 물성변화를 모델링 파라미터에 반영하였다. 소성변형 파라미터 분석에 따라 공용성 평가항목중 소성침하에 미치는 설계요소를 확정할 수 있었다.

주요어 : 아스팔트 노반, 수치해석, 소성변형, Creep model

1. 서 론

최근 철도는 수송량의 증가와 고속화에 따라 궤도의 안정성과 내구성을 확보하기 위한 새로운 궤도 구조의 설계가 필요한 시점이다. 일반적인 유도상 궤도의 경우, 통과톤수의 증가와 궤도 하부에 작용하는 반복적인 하중의 영향으로 인해 잦은 유지보수를 필요로 한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 국내는 물론 국외 많은 나라에서 콘크리트 슬래브를 적용한 생력화 궤도를 고속철도에 적용하고 있으나, 콘크리트 슬래브 궤도는 균열 발생과 소음 및 진동 등의 문제를 유발할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 독일 등의 철도 선진국에서는 아스팔트 노반을 개발하여 적용하고 있으며, 최근 국내에서는 궤도의 지지력과 주

† 교신저자: 배재대학교 건설환경 철도공학과(yujin@pcu.ac.kr)

* 배재대학교 건설환경 철도공학과

** 철도기술연구원

행안정성을 개선하기 위한 목적으로 아스팔트 노반의 도입을 기술적으로 검토 중에 있다.

2. 수치해석을 이용한 아스팔트 궤도의 거동 분석

2.1 누적 소성변형 예측 모델

현재까지 많은 연구자들에 의해 반복하중을 받는 노반의 소성 변형률(ϵ_p)에 관한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 대부분의 연구들은 가장 일반적인 모델인 식 (1)과 같은 지수 함수 형태의 모델을 사용하거나 수정하여 적용하고 있다[1-3].

$$\epsilon_p = AN^b \quad (1)$$

여기서, N은 반복재하횟수, A 및 b는 모델 정수. 이 외에도 다양한 방정식 및 다항식 모델을 사용한 예측 모델이 제안되었다. 이러한 예측 모델들은 현장 및 실내시험을 통한 실측 데이터를 기반으로 구성된다. 본 연구에서는 아스팔트 궤도의 누적 소성 변형량을 예측하기 위하여 ABAQUS 유한요소해석 프로그램의 Creep model을 선택하였다. 식 (2)는 Creep model을 설명한 것으로서 층 재료의 응력 조건과 반복재하회수를 고려하여 소성 변형의 증가를 예측할 수 있는 장점이 있다.

$$\epsilon_c = \frac{A}{m+1} \sigma^n N^{m+1} = A\sigma^n N^m \quad (2)$$

여기서, ϵ_c 는 누적 소성 변형률(%), A, n, m은 각 노반 재료의 종류 및 물리적 특성(온도 감온성), 응력상태에 따른 경험적 변수를 나타낸다. n σ 는 반복 재하에 대한 등가응력(equivalent stress)로 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{q - p \tan \beta}{1 - (1/3) \tan \beta} \quad (3)$$

여기서, p는 평균주응력이고, q는 축차응력이고 β 는 p-q응력공간에서의 파괴포락선의 각도이다.

2.2 해석 조건 및 방법

해석 대상은 한국 철도기술연구원에서 수행한 실험형 아스팔트 궤도에 국한하였다(Fig. 1 참조). 궤도 구성은 Table 1과 같다.

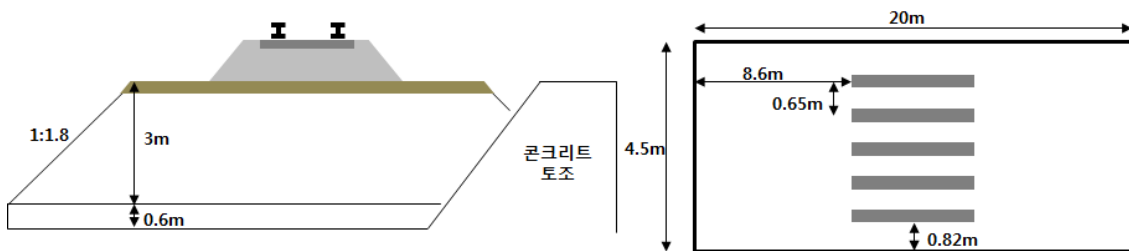


Fig. 1 KRRR full-size asphalt track section

Table 1 Sectional difference in track section

Variable of track	Asphalt layer thickness	Sub-ballast thickness	speed
Ballast Track	-	40cm	300km/h
Ballast Asphalt Track	5cm	15, 25, 35cm	300km/h

유도상 궤도 및 유도상 아스팔트 궤도의 수치해석을 수행하기 위해서 선행연구와 현장 시험에서 결정한 물성치를 적용하였다[4]. 실대형 궤도 단면은 국내 고속철도 궤도 구조와 동일하다.

해석에 사용한 하중은 KTX열차 축하중 170kN의 1/2인 85kN을 정적윤중으로 정한 후 열차하중의 동적 효과를 고려하기 하여 열차속도의 함수인 식 (4)과 같은 속도 충격계수를 곱하여 구하였다. 열차속도 300km/h에 해당하는 속도 충격계수 1.8을 적용하여 동적윤중 153kN을 결정하였다.

$$i = 1.0 + 0.3\left(\frac{V}{100}\right) \quad (4)$$

앞서 설명한 누적 소성 예측모델 변수 A, n, m을 수치해석에 적용하여 재하횟수에 따른 소성 침하량을 예측하였다. 본 해석에 사용된 재료 강성 등의 물성치는 선행연구에 의해 결정되었다[4]. 해석시 상하부노반의 경우 현재 고속철도 설계 기준에서 사용되고 있는 E_{v2} 기준값을 탄성계수로 환산하고 이를 상중하 3등급으로 구분하였다[6]. 아스팔트 혼합물의 경우 온도 변화에 민감함 재료이기 때문에 계절별 탄성계수를 달리하여 해석하였다. 하중은 중앙 레일에 윤중 153kN을 재하하였고 해석에 사용된 물성치는 다음 Table 2와 같다.

Table 2 Material input values used in numerical analysis

	Elastic Modulus E(MPa)	Poisson's ratio ν	Density ρ (ton/m ³)	Creep model parameter		
				A	n	m
Rail	210000	0.3	7.8	-	-	-
Pad	40000 kN/m	-	-	-	-	-
Sleeper	29100	0.2	2.3	-	-	-
Ballast	100	0.2	2	-	-	-
Asphalt mixture	2000(Spring) 3000(Summer) 4000(Fall) 7000(Winter)	0.35	2.36	Table 3	0.67	-0.5
Reinforced roadbed	180	0.2	2	Table 3	0.8	-0.9
Subgrade	50 80 120	0.3	2	Table 3	0.8	-0.9

식(2)의 소성변형 예측식을 활용하여 궤도하부구조의 누적소성침하량을 예측하기 위해서는 모델파라미터 A, n 및 m이 결정되어야 한다. 이 중 가장 크게 영향을 미치는 파라미터인 변수 A 값을 변화시키면서 Table 3의 CASE 1~5와 같이 측정결과와 비교하여 최종소성침하량 값에

가장 근사한 결과를 도출하는 A값을 선택하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 CASE 3의 A값 조합으로 측정값과 가장 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3 Parametric studies for choosing optimum analysis condition

	A		
	Asphalt trackbed	Reinforced roadbed	subgrade
CASE 1	3.0E-9	3.0E-8	3.0E-7
CASE 2	9.0E-9	9.0E-8	9.0E-7
CASE 3	5.0E-9	5.0E-8	5.0E-7
CASE 4	7.0E-9	7.0E-8	7.0E-7

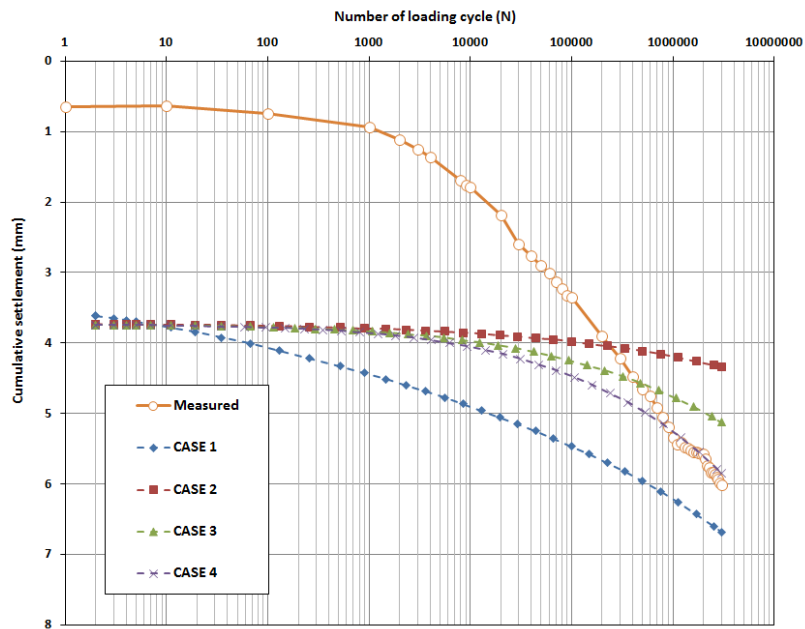


Fig. 2 Comparison of measured cumulative settlement with numerically predicted results

수치해석 모델링에서 레일 및 패드는 빔 요소 및 스프링 요소로 모델링 하였고, 침목 및 노반은 솔리드 요소로 모델링 하였다. 해석에 사용한 유한 요소망은 Fig.3와 같다.

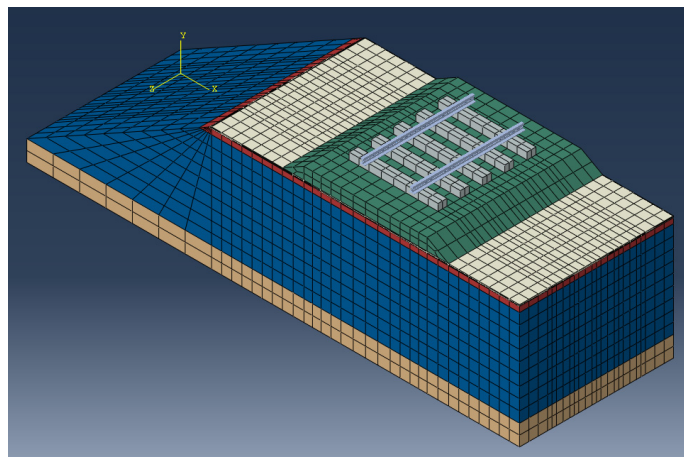


Fig. 3 Three-dimensional finite element mesh used in numerical analysis modeling for ballasted asphalt track

3. 수치해석을 통한 누적 소성 변형 예측 검증

결정된 모델 파라미터 A, n, m값과 Table 2에 설명된 노반 및 아스팔트 노반의 물성치를 사용하고 Creep 모델을 적용, ABAQUS 유한요소해석 프로그램을 이용한 소성침하량 예측을 시도하였다. 강화노반 두께(RB : Road bed thickness)를 달리하였을 때 반복하중 300만회 재하시 까지의 누적 소성침하량을 산출하였다. 아스팔트궤도에 대한 실험적 가력시험 결과와 본 연구에서 시도한 수치해석 예측값을 비교한 결과는 Fig. 4(a)와 같이 재하회수 약 3,000,000회에서 비교적 일치하는 결과를 보였다. 실험적 시험에서 시도하지 못한 강화노반 두께 변화시의 누적소성침하량을 예측한 결과는 Fig. 4(b)와 같다. 해석결과에서 판단할 수 있듯이 유도상아스팔트 궤도의 두께가 일정($t=5\text{cm}$)할 때, 강화노반 두께를 증가시킬 경우 일정두께 까지는 소성침하량의 감소를 기대할 수 있으나 그 이상의 두께(예: 두께 $t=35\text{cm}$)에서는 소성침하량이 더 이상 감소하지 않는 결과를 보였다. 이는 소성침하량을 설계기준 값으로 설정할 경우, 두께 5cm인 유도상 아스팔트 궤도에서는 적정 강화노반 두께가 최대 25cm 이상이 될 필요가 없음을 의미한다.

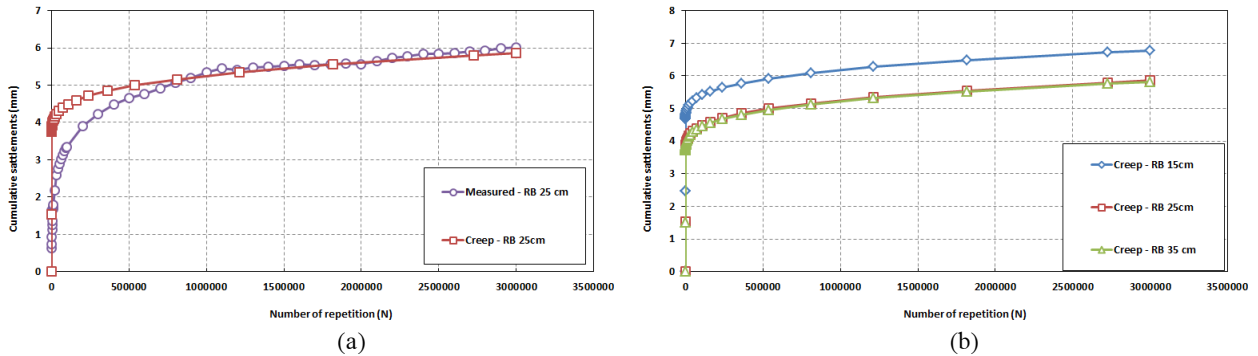


Fig. 4 Result of numerical analysis for permanent deformation of ballasted asphalt track

본 연구에서 선택, 사용한 creep 모델에 의한 소성침하량 예측기법을 보다 정확히 적용하기 위해서는 아스팔트 혼합물에 대한 반복삼축시험 결과로부터 파라미터 A, n, m을 결정하여야 한다. Table 4은 철도구조물등 설계표준·동해설 부속자료(2001) [5]에서 보인 슬래브 궤도의 열차 반복 하중에 의한 침하량 해석 자료이다. 해석 결과 본 연구에 의한 300만회 재하시 누적 소성 침하량과 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 궤도구조의 차이를 고려하더라도 이와 같은 유사한 결과는 유도상 아스팔트궤도의 소성변형에 대한 탁월한 내구성을 설명하는 것이다.

Table 4 Predicted settlement by wheel loading repetitions on concrete slab track

Subgrade Soil	Fill height 3m		Fill height 6m	
	1 million times	10 million times	1 million times	10 million times
	$\delta(\text{mm})$	$\delta(\text{mm})$	$\delta(\text{mm})$	$\delta(\text{mm})$
Soil 1 : good sand and gravel, etc	5.9	6.1	9.2	9.9
Soil 2 : General sand and gravel	19.3	27.7	-	-
Soil 3 : Bad sand	128.6	176.8	-	-
Soil 4 : Clay	160.4	239.2	-	-

4. 결 론

본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 실제 궤도 구조를 기하학적으로 3-D 모델링 하였다. 해석 대상궤도에 대한 장기적인 반복재하에 의한 누적 소성 침하예측 모델링 기법을 제시하였으며 이 해석모델링 기법을 실험형 유도상 아스팔트 궤도에 적용, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 실험시험에 의해 측정된 소성침하량 결과와 비교하여 가장 일치하는 소성침하량결과를 보이는 creep 모델 파라미터 (A, n, m)을 획득하였다. 예측된 소성침하량 결과와 실험 시험에 의한 측정 침하량 결과는 거의 일치하였다.
- (2) creep 모델 파라미터를 결정한 후 강화노반 두께 변화를 달리하여 총 300만회 재하시 유도상 아스팔트 궤도의 전체 누적 소성 침하량을 예측하였다. 유도상아스팔트 궤도의 두께가 일정($t=5\text{cm}$)할 때, 강화노반 두께를 증가시킬 경우 일정두께 까지는 소성침하량의 감소를 기대할 수 있으나 그 이상의 두께(예: 두께 $t=35\text{cm}$)에서는 소성침하량이 더 이상 감소하지 않는 결과를 보였다. 이는 소성침하량을 설계기준 값으로 설정할 경우, 두께 5cm인 유도상 아스팔트 궤도에서는 적정 강화노반 두께가 최대 25cm이상이 될 필요가 없음을 의미한다.

후 기

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

참고문헌

- [1] Monismith, C. L.; Ogawa, N. & Freeme, C. R. (1975), Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading. Transp. Res. No.537. Transportation research board. Washington D. C..
- [2] Li, D. Selig, E. T (1996), Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE. 122(12), pp.1006-1013.
- [3] MBAKISYA A. ONYANGO (2009), VERIFICATION OF MECHANISTIC PREDICTION MODELS FOR PERMANENT DEFORMATION IN ASPHALT MIXES USING ACCELERATED PAVEMENT TESTING, DOCTOR OF PHILOSOPHY, KANSAS STATE UNIVERSITY.
- [4] Korea Railroad Research Institute (2011), Research in order to secure the competitiveness of railway construction(interim report), Korea Rail Network Authority.
- [5] Railway Technical Research Institute (2007) Design standards for railway structures and commentary earth structures, railway technical research institute.
- [6] Korea Railway Network Authority(2011), Rail design standard(roadbed), Korea Railway Network Authority.
- [7] Nsabimana, E., Won, S. S., Jung, Y. H., Lee, S. H., (2013), Numerical Prediction of Cumulative Plastic Strains in the Railway Subgrade Under Low-Amplitude Cyclic Loading, Journal of the Korean Society for geotechnical, Spring conference.