

# 영구변형에 기반한 아스팔트 노반층의 간이 설계알고리즘 개발

## Development of Simple Algorithm for Design of Asphalt Trackbed foundation based on Permanent Deformation

임유진\*<sup>†</sup>, 이성혁\*\* , 이진욱\*\*

Yujin Lim \*<sup>†</sup>, Seong Hyeok Lee \*\* , Jin-Wook Lee \*

**Abstract** Permanent deformation in asphalt trackbed foundation can be generated by increasing number of load repetition due to train traffic increases, causing track irregularity. Therefore, a design algorithm for consideration of permanent deformation must be included in construction of distress model for this kind of track structure. In this study, a specially prepared HMA trackbed foundation layer has been constructed in a small prismatic chamber and tested using a repetitive axial loading device to simulate live track loadings. In this study, a new concept of track compliance and equivalent modulus of track section are proposed. Using the measured permanent deformation data by performing loading-unloading test in the prismatic chamber, a relation between permanent deformation and track compliance is generated. For design purpose, a simple design nomograph based on permanent deformation and track compliance,  $C$ , for the asphalt track can be provided successfully in this study.

**Keywords** : Asphalt trackbed, design algorithm, permanent deformation, equivalent elastic modulus

**초 록** 본 연구에서는 아스팔트 궤도구조 설계에 활용할 목적으로, 영구변형량( $\delta$ )과 궤도 하부구조의 등가탄성계수( $E_{equiv}$ )에 기반하여 아스팔트 노반의 적정두께를 결정할 수 있는 간이 설계 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 모형토조 내에 아스팔트 노반을 포함한 궤도하부구조층과 침목 및 레일을 설치하고 반복가력에 의한 동재하시험을 실시하여 침하량( $\delta$ )~반복재하회수( $N$ ) 관계를 구하였다. 또한 정적 반복재하시험을 사전에 실시하여 궤도하부구조의 등가탄성계수를 획득하였다. 이와 같은 관계를 상호분석하여 침목저면에 발생하는 압력( $p$ )과 궤도하부 등가탄성계수( $E_{equiv}$ ) 관계를 이용한 track compliance ( $C$ ) 개념을 제시하였다. 이를 이용하여 설정된 한계 소성침하량( $\delta_{crit.}$ )에 대비 하부구조배열과 아스팔트 노반두께를 결정할 수 있는, 공용년수~track compliance ( $C$ )사이의 관계를 설정하는 설계 노모그래프를 개발하였다.

**주요어** : 아스팔트 노반, 설계알고리즘, 소성변형, 등가탄성계수

### 1. 서론

가열 아스팔트(HMA)를 활용하는 아스팔트 궤도는 영구변형, 피로 등의 손상을 받을 수 있다. 따라서 영구변형(소성변형)과 피로는 아스팔트 노반의 주요 설계인자가 된다. 현재 기 제시된 아스팔트 궤도 설계법([1],[2])은 대부분 영구변형의 발생을 무시하고 아스팔트 층 하면에서의 인장변형률( $\epsilon_t$ )과 흙노반 상면에 발생하는 수직응력( $\Delta\sigma_v$ )이 설정된 기준값 이하인지를 기준으로 소정의 반복재하회수 즉, 공용년수에 대응하는 설계두께의 적정성을 판단한다.

<sup>†</sup>\* 교신저자 : 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과(yujin@pcu.ac.kr)

\*\* 한국철도기술연구원

그러나, 보다 엄밀하고 효율적인 설계와 궤도틀림으로 인한 유지보수비용의 감축을 위해서는 아스팔트 노반층에서의 영구변형에 대한 검토가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 아스팔트 궤도구조 설계에 활용할 목적으로, 영구변형량( $\delta$ )과 궤도하부구조의 등가탄성계수( $E_{equiv}$ )에 기반하여 아스팔트 노반의 적정두께를 결정할 수 있는 간이 설계 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 모형토조 내에 아스팔트 노반을 포함한 궤도하부구조층과 침목 및 레일을 설치하고 반복가력에 의한 동재하시험을 실시하여 침하량( $\delta$ )~반복재하회수( $N$ ) 관계를 구하였다. 또한 정적 반복재하시험을 사전에 실시하여 궤도하부구조의 등가탄성계수( $E_{equiv}$ )를 획득하였다. 이와 같은 관계를 상호분석하여 침목저면에 발생하는 압력( $p$ )과 궤도하부 등가탄성계수( $E_{equiv}$ ) 관계를 이용한 track compliance ( $C$ ) 개념을 제시하였다. 이를 이용하여 설정된 한계 소성침하량( $\delta_{crit.}$ )에 대비 하부구조배열과 아스팔트 노반두께를 결정할 수 있는, 공용년수~track compliance ( $C$ )사이의 관계를 설정하는 설계 노모그래프를 개발하였다.

## 2. 아스팔트 궤도모형 가력시험

### 2.1 아스팔트 혼합물 시편에 대한 반복삼축시험

아스팔트 노반 전용 혼합물에 대한 잠정 배합설계법(밀입도, PG-64-22바인더, 공극률=3%, 유효바인더함량비 5%)을 이용하여 선회다짐시험기로 혼합물 시편( $D=5\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ )을 제작하였으며 이를 이용하여 반복삼축압축시험(Repeated Load Permanent Deformation Test: 이하 RLPD시험)을 항온조 온도 각 30, 45 and 60 °C 에서 실시하였다. 구소압은 138 kPa이었으며 축차응력은 138 kPa의 크기로 반정현과로 가하였다. 이와 같은 시험은 아스팔트 혼합물에 대한 소성특성을 파악하기 위한 것으로서 재하회수  $N=180,000$ 회까지 선형변위계를 통해 수직변위 발생량을 측정하였으며 이를 이용하면 재하회수증가에 따른 혼합물의 소성변형 발생특성을 분석할 수 있다.

### 2.2 아스팔트 궤도모형에 대한 반복가력시험

Fig.1과 같이 모형토조 내에 흙노반, 강화노반, 아스팔트 혼합물층 및 도상자갈층을 두께를 다르게 하여 자갈도상궤도와 아스팔트궤도를 각각 구성하고 상단에 콘크리트 침목을 부설한 후 레일을 체결하였다. 가력장치를 이용하여 구성된 모형 아스팔트 궤도에 대한 가력시험(Repeated Load Test with Pismoidal Chamber, 이하 RLTP)을 실시하였다. 토조내 조성된 궤도하부구조 크기는 길이 1200mm, 높이 및 폭 각 600 mm, and 600이다. 재하중은 운중 62 kN을 1Hz의 사인파로 총 300,000회 가하였다. 반복재하시험전 정적재하시험을 단계별로 가하거나 제하-재제하를 실시하여 하중( $p$ )-침하관계( $\delta$ )를 획득하였다.

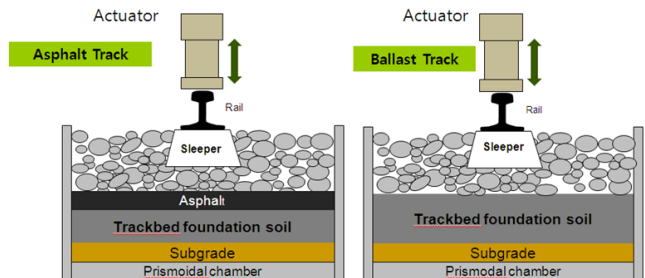
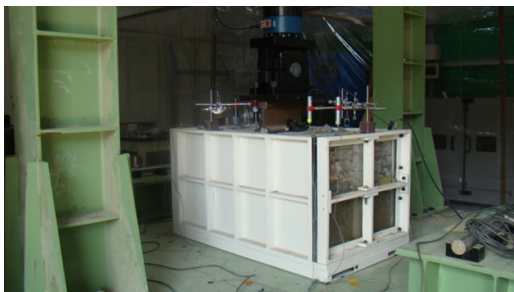


Fig. 1 Repeated axial load test on model asphalt track constructed in prismatic chamber

### 2.3 시험 결과

Table 1은 RLPD시험데이터를 정리, 분석한 것이다. 영구변형 모델 파라미터 추출을 위하여 Power모델을 선택하고 모델정수 a, b를 표와 같이 구하였다. Table 2는 모형 아스팔트궤도에 대한 RLTP시험 결과를 정리한 것이다.

**Table 1** Summary of RLPD test results

Mix ID	Mix Design		RLPD Test			
	Air Void (%)	Asphalt Content (%)	a	b	FN	$\epsilon_p, N=40,000$ (%)
WC-4 Temperature 45°C	3	4.8	0.01284	0.32165	-	0.884
WC-4 Temperature 60°C	3	4.8	0.00307	0.51983	57,635	2.350

**Table 2** Summary of RLTP test results

RLTP Test	Displacement, $\delta_v$				Vertical Permanent Strain, $\epsilon_p$			
	a	b	N=40,000 (mm)	N=300,000 (mm)	a	b	N=40,000 (%)	N=300,000(%)
ASP Track RST=20cm	0.0558	0.2567	0.917	1.473	0.0139	0.2567	0.229	0.368
ASP Track RST=15cm	0.0465	0.2878	0.990	1.768	0.0133	0.2878	0.283	0.505
Ballast Track	0.0135	0.3982	1.005	2.050	0.0034	0.3982	0.251	0.513

Fig.2(a)는 RLTP시험에서 획득된 반복재하회수(N)~수직영구변형량( $\delta$ ) 관계를 도시한 것이다. 수직영구변형량을 영구변형률( $\epsilon_p$ )로 환산한 후 재도시 하면 Fig.3(b)와 같고 이를 양변로그를 취하면 Power모델 파라미터(a, b)를 Table 2와 같이 구할 수 있다. Power모델 파라미터를 이용하여 예측한 결과와 실측결과를 Fig.3에 비교하여 도시하였다. 반복재하회수 N=300,000회까지 어떠한 소성흐름도 발견되지 않았으며 모두 hyperbolic모델로 예측할 수 있음이 확인되었다. 아스팔트층(두께 5cm)을 포함한 동일강화노반두께(강화노반 총두께=25cm)에서 유도상아스팔트궤도의 발생 영구변형률이 도상자갈궤도의 소성변형에 비하여 크게 작은 결과가 도출되어 유도상아스팔트궤도의 침하에 대한 저항성이 확보됨을 확인하였다. 아스팔트층을 포함한 강화노반두께를 20cm로 5cm줄일 경우, 도상자갈궤도(강화노반 두께 25cm)의 영구변형률 발생크기는 거의 동일하게 나타났으나 궤도하부층구조의 가변형 두께를 고려하여 침하량을 산정하면 Fig.2(a)와 같이 순침하량은 도상자갈궤도가 더 크게 발생한다. 이때 흙노반에서의 침하량 발생은 무시하였다.

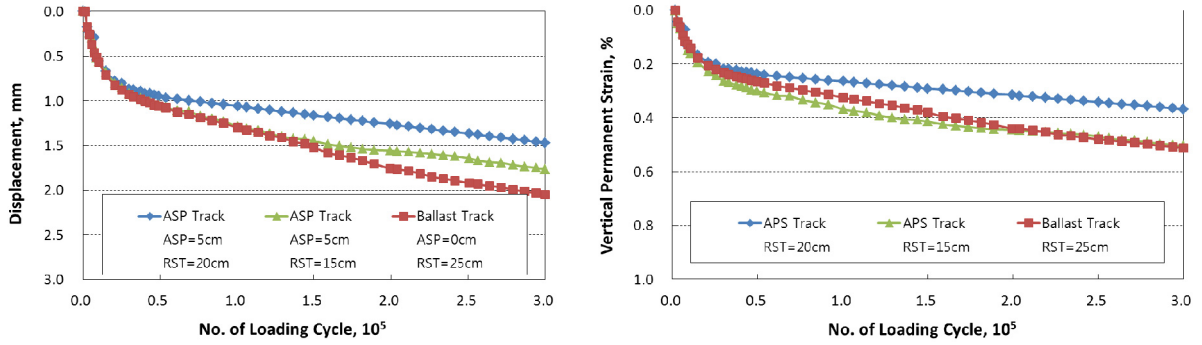


Fig. 2 Comparison of RLTP axial load test on model asphalt track: settlement and vertical plastic strain

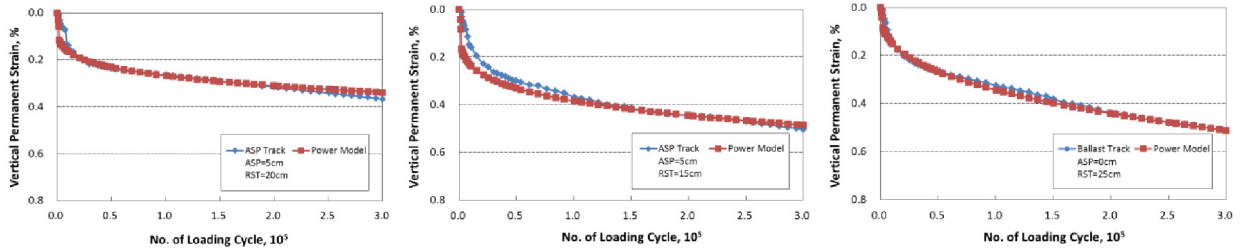


Fig. 3 Comparison of RLTP axial load test on model asphalt track with Power model prediction

### 3. 간이영구변형 알고리즘 개발

#### 3.1 영구변형 모델

궤도하부구조를 구성하는 각층재료의 영구변형( $\epsilon_p$ ) 예측모델은 식(1)과 같이 재하회수(N)을 이용한 Power모델로 표현할 수 있다.

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

여기서,  $a, b$  = Power모델 파라미터로서 영구변형률( $\epsilon_p$ )~재하회수(N) log-log 관계도의 절편과 기울기에 해당한다. 입상재료에 적용시 Li and Selig [5]는 Power모델 파라미터  $a$ 에 대하여 아래와 같은 관계를 제시한 바 있다.

$$a = c(q/q_u)^d \quad (2)$$

여기서,  $c, d$  = 재료상수,  $q$  = 축차응력,  $q_u$  = 일축압축강도.

아스팔트 혼합물의 영구변형 예측모델 중 최근 개발된 바 있는 AASHTO2002모델은 식(3)과 같은 형태로 표시된다.

$$\epsilon_p / \epsilon_r = [10^{3.3542} T^{1.506} N^{0.4792}] \beta \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_r$  = 수직회복탄성변형률,  $T$  = 온도,  $N$  = 재하회수,  $\beta$  = 깊이 및 아스팔트층두께 보정계수  
 식 (1)과 같은 Power모델의 형태로 도상자갈궤도의 침하량( $\delta$ )~재하회수(N) 관계가 표현될 수

있음이 지적된 바 있다[3]. 따라서, 모델계수  $a$ ,  $b$ 를 이용하는 레도침하량( $\delta$ )~재하회수( $N$ ) 관계를 아래와 같이 레도하부구조의 증가강성을 포함하는 형태로 표현할 수 있다. 이는 Li and Selig [5]의 식과는 달리 강도개념 보다는 강성을 포함하도록 한 것이다.

$$\delta_{p\_total} = aN^b = c(p/E_{equiv.})^d N^b = K_1 N^b \quad (4)$$

여기서,  $c(p/E_{equiv.})^d$ 는 식 (1)의 모델파라미터  $a$ 에 해당하며 침목하부 저면압력  $p$ 와 증가탄성계수( $E_{equiv.}$ )의 크기에 지배된다. 증가탄성계수는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$E_{equiv.} = \frac{E_B t_B + E_A t_A + E_{RS} t_{RS} + E_{SG} t_{SG}}{t_B + t_A + t_{RS} + t_{SG}} \quad (5)$$

여기서,  $E_B$  = 도상자갈 탄성계수,  $t_B$  = 도상자갈유효두께,  $E_A$  = 아스팔트탄성계수,  $t_A$  =아스팔트노반층 두께,  $E_{RS}$  =쇄석강화노반층 탄성계수,  $t_{RS}$  = 쇄석강화노반층 두께,  $E_{SG}$  =흙노반 탄성계수,  $t_{SG}$  = 레도응력이 미치는 흙 노반상면으로부터의 유효깊이로서 쌓기구간에만 적용.

식 (4)는 증가탄성계수를 이용하여 레도하부구조의 전침하량을 평가할 수 있는 반면에 아스팔트 노반층 자체의 점소성특성에 의한 소성변형을 정확히 산정하지 못한다. 아스팔트 노반층의 정확한 소성변형은 식(3)과 수치해석에 의해 구할 수 있다. 즉, 유한요소해석에 의해 레도하부 아스팔트노반층에서의 수직, 수평응력을 구하고 동탄성계수를 이용하면 식(6)으로부터 수직 회복변형률( $\epsilon_r$ )을 산정하여 최종적으로 아스팔트층 만의 소성변형량을 구할 수 있다.

### 3.2 Track compliance의 개념

Track compliance는 레도하부구조의 변형에 대한 추종성으로 해석할 수 있다. 이와 같은 개념은 레도하부구조의 침하발생에 미치는 증가강성( $E_{equiv.}$ ) 및 윤중의 영향 정도를 판단할 수 있는 판단지수로 활용될 수 있다. 각 레도하부 구성층재료의 강성은 해당 다짐도에 해당하는 시편을 제작하여 공진주시험(RC) 등으로부터 구할 수 있다. 또한 아스팔트 노반층 혼합물의 경우 선회다짐기를 이용하여 다진 시편을 이용하여 소형충격공진주시험 및 초음파시험 등 다양한 시험방법으로 통해 동탄성계수( $E^*$ )를 획득할 수 있다. 이와 같이 각층의 재료강성을 직접구하는 방법 외에 본 연구에서와 같이 레도에 대한 정적 반복재하시험으로부터 하중( $p$ )-침하관계( $\delta$ )를 획득하여  $K1$ (또는  $a$ ) 및  $b$ 를 구할 수 있다. 레도구조 차이에 따른 하중-침하관계를 추가로 구하기 위하여 3D ABAQUS 유한요소해석에 의해 반복재하시험을 모사하였으며 이에 의해 획득된 하중-침하관계와 모형아스팔트레도에 대한 시험결과를 Fig.4에 함께 도시하였다. 이때 track compliance를 구하기 위하여 침하량에 해당하는 반복재하하중값을 침목점지면적으로 나누어 압력  $p$ 를 구하고 증가탄성계수는 반복재하시험의 제하-재하하부 기울기로부터 구할 수 있다.

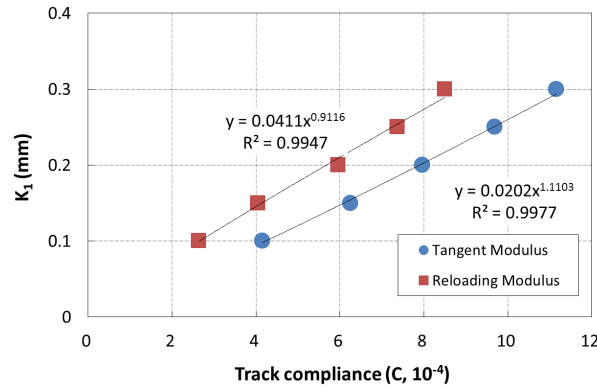


Fig. 4 Construction of correlation graph between K1 and track compliance

따라서, 식 (4)와 획득된 Fig.4에서 획득된 모델 파라미터 a, b와 반복재하회수 N을 이용하여 총소성침하량을 예측하면 Fig. 5에서와 같이 다양한 값의 track compliance에 따라 궤도총침하량의 발생을 추정해 볼 수 있다. 그림에서와 같이 한계침하량을 설정하면 허용재하회수(N)를 구할 수 있고 이에 해당하는 설계수명을 주어진 통과톤수와 윤중조건에서 Table 3과 같이 구할 수 있다. 따라서, 최종적으로 궤도하부구조의 track compliance에 따라 설계수명을 설정할 수 있게 된다.

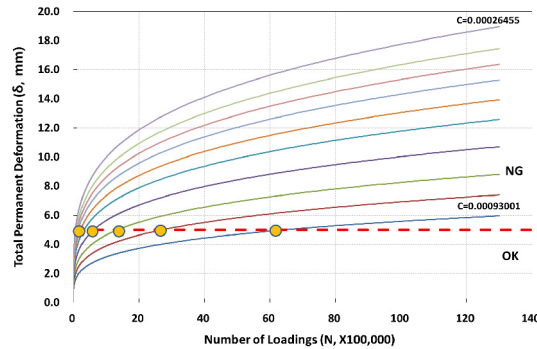


Fig 5 Predicted total permanent deformation with different values of track compliance

Table 3 Calculation of design life

Design Life (years)	MGT (tonnes)	$P_s$ w/DAF (kN)	Number of load repetitions N
10 ~ 90	10,000,000	153	$N = (DesignLife) \times (MGT) \times 10kN / 4P_s$

#### 4. 결론

- (1) 본 연구에서는 아스팔트 궤도구조 설계에 활용할 목적으로, 영구변형량( $\delta$ )과 궤도하부구조의 등가탄성계수( $E_{equiv}$ )에 기반하여 아스팔트 노반의 적정두께를 결정할 수 있는 간이 설계 알고리즘을 개발하였다.
- (2) 모형토조 내에 아스팔트 노반을 포함한 궤도하부구조층과 침목 및 레일을 설치하고 반복가력에 의한 동재하시험을 실시하여 침하량( $\delta$ )~반복재하회수(N) 관계와 반복재하시험에

의한 하중-침하관계를 구하여 궤도하부구조의 등가탄성계수를 획득하였다.

- (3) 시험결과를 분석하여 침묵저면에 발생하는 압력( $p$ )과 궤도하부 등가탄성계수( $E_{equiv}$ ) 관계를 이용한 track compliance (C) 개념을 제시하였다. 이를 이용하여 설정된 한계 소성침하량( $\delta_{crit}$ )에 대비 하부구조배열과 아스팔트 노반두께를 결정할 수 있는, 공용년수~track compliance (C)사이의 관계를 설정하는 설계 노모그래프의 개발이 가능함을 확인하였다.

## 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] Y. H. Huang, J.G. Rose, C.J. Khoury (1987). Thickness Design for Hot-Mix Asphalt Railroad Trackbeds, Ed E.L. Skok Jr., Proc. Association of Asphalt Technologies
- [2] Japanese Design Standard Specifications for Railway Structures (2007)
- [3] B. Indraratna, W. Salim, C. Rujikiatkamjourn (2011). Advanced Rail Geotechnology-Ballasted Track, CRC Press
- [4] E. Berggren (2009). Railway Track Stiffness-Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance, Doctoral Thesis, Royale Institute of Technology
- [5] D. Li and E. T. Selig (1996). Cumulative Plastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(12), ASCE, pp 939-013
- [6] J. Kennedy (2011). A Full-Scale Laboratory Investigation into Railway Track Substructure Performance and Ballast Reinforcement, Ph.D. Dissertation, Heriot-Watt University
- [7] R.B. Leahy (1989). Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete, Ph.D. Dissertation, University of Maryland, College Park
- [8] M. Ayres Jr. (1997). Development of a Rational Probabilistic Approach for Flexible Pavement Analysis, Ph.D. Dissertation, University of Maryland at College Park
- [9] M.W. Witzak (2004). Development of a mastercurve ( $E^*$ ) database for lime modified asphaltic mixtures, Arizona State University, Department of Civil and Environmental Engineering
- [10] Y.J. Lim, J.K Hwang, H. Cho (2012). Development of Permanent Deformation Prediction Model for Trackbed Foundation Materials based on Shear Strength Parameters, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(8)