

## 궤도설계를 위한 아스팔트 노반층의 영구변형 발생 예측

### Prediction of Permanent Deformation for Design in Asphalt Trackbed Foundation

이병식\*, 박재범\*\*†, 송근우\*\*, 임유진\*\*

Byeongsik Lee\*, Jaebeom Park\*\*†, Geunwoo Song\*\*, Yujin Lim\*\*

**Abstract** In this study, permanent deformation of asphalt trackbed is investigated by performing repetitive load test on specimen made with dense graded asphalt mixture that is prepared specially for the track. The obtained test results are compared with those computed from the prediction model proposed by AASHTO in 2002 called MEPDG. Prediction model adaptable only for permanent deformation of asphalt trackbed foundation has not been developed yet so that the prediction model by AASHTO is used in this study to simulate permanent deformation of trackbed foundation in asphalt slab track and ballasted asphalt track. In order to do simulate permanent deformation, a finite element analysis is performed to obtain generated stresses in trackbed due to wheel load. It is found that the predicted permanent deformation is much smaller than anticipated and the asphalt track can be stable during service life of the structure.

**Keywords** : Asphalt Trackbed, Permanent deformation, Finite Element Analysis

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 깊이 별 발생응력을 산출한 후 공용중 발생 가능한 영구변형량을 계산할 수 있었다. 예측된 소성 침하량은 극미하여, 공용중 침하에 대한 내구성 확보가 가능한 것으로 판단되었다.

주요어 : 아스팔트 노반, 영구변형, 유한요소해석

## 1. 서론

철도는 육상교통수단 중 국가경제활동의 이동과 접근을 제공하는 매우 중요한 사회 간접 자본 시설이다. 특히, 철도노반을 포함한 궤도구조는 빈번하게 운행되는 철도차량의 중량을 안전하게 지지하고 열차의 통과하중을 하부지반으로 분산, 전달하는 역할을 감당하며 궤도의 파손, 틀림 등 궤도의 안정성에 직접적인 영향을 주기 때문에 열차의 주행안정성에 직결되는 매우 중요한 부분이다.

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

\* 세담엔지니어링, 전 배재대학교

\*\* 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과

본 연구에서는 아스팔트 노반설계법에서 영구변형 예측모델 수립을 위한 아스팔트 노반 혼합물의 잠정 배합설계를 바탕으로 제작된 혼합물 시편에 기본 역학시험을 실시, 역학특성을 검토하였다. 역학적 기본 요구특성이 만족된 시편을 대상으로 반복삼축시험을 실시하여 시험으로부터 획득한 영구변형결과를 도로포장분야에서 아스팔트 포장체의 영구변형 예측을 위하여 개발된 AASHTO 2002[1] 및 한국형 포장설계법[2] 영구변형 예측식을 차용하여 비교, 검토하였다. 이를 통해 노반용 밀입도 아스팔트 혼합물의 영구변형 발생특성을 검토하였다. 또한 3D 유한요소해석을 통해 아스팔트 케도의 깊이별 영구변형률 발생패턴을 온도 대역별로 산출하여 실제 아스팔트 노반상에 발생할 수 있는 영구변형 발생크기를 예상하였다.

## 2. 노반용 아스팔트 혼합물의 영구변형 예측모형

### 2.1 일반 아스팔트 혼합물의 영구변형 예측모형

영구변형예측을 위한 모델개발이 여러 연구자에 의해 시도되었고, 특히 Monismith[3]의 power모델은 재료의 영구변형률( $\epsilon_p$ )과 반복재하횟수(N)의 관계를 식(1)과 같이 표현한다.

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

아스팔트 혼합물로 구성된 층의 공용성 평가를 위해 영구변형을 정확히 예측 할 수 있어야 한다. power모델 외에 아스팔트 혼합물 영구변형 예측모델로 개발된 식들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

초기 AASHTO 2002 설계법에서는 아스팔트 영구변형 예측을 위해 식(2)와 같은 영구변형 예측식이 사용되었다.

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3.15552} T^{1.734} N^{-0.39937} \quad (2)$$

위의 식(2)에서 회복변형률에 대한 영구변형률 비는 아스팔트의 온도(T)와 하중재하횟수(N), 2개의 변수만을 이용하여 예측할 수 있다. 다음 식(3)은 한국형 포장설계법에서 제시된 예측식으로 회복변형률에 대한 영구변형률 비를 아스팔트 혼합물의 온도, 하중재하횟수 및 공극률( $V_a$ ) 3가지 변수를 이용하여 예측한다. 또한 혼합물별 예측공식상 계수(A, B, C, D)를 사용한다.

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^D N^A T^B V_a^C \quad (3)$$

### 2.2 아스팔트 깊이 효과를 고려한 영구변형 예측모형

AASHTO 2002 MEPDG에서는 LTPP 프로그램이 적용되는 28개주 88개소의 관측자료(미네소타주 도로국, MnRoad)를 활용, 깊이 보정계수  $k_1$ 이 도입되었다[4].

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 \times 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244} \quad (4)$$

여기서  $k_1$ 은  $0.328196^{\text{depth}}(C_1+C_2\text{depth})$ 로  $\text{depth}$ 는 영구변형률 산정위치까지의 깊이(inch),  $C_1$ 은  $-0.1039h_{ac}^2 + 2.4868h_{ac} - 17.342$ ,  $C_2$ 는  $0.0172h_{ac}^2 - 1.7331h_{ac} + 27.428$ ,  $H_{ac}$ 는 아스팔트층의 총 두께(inch)다. 식(5)와 같이 아스팔트 동탄성계수와 Hooke의 법칙을 사용하여 회복탄성변형률을 산정한 후 식(4)에 대입하여 영구변형률을 결정한다. 영구변형률이 결정되면 각 층의 영구변형량을 식(6)을 이용하여 결정할 수 있다. 식(5)에 사용된 동탄성계수( $E^*$ )는 혼합물의 재료특성, 온도 및 하중 주파수의 함수이다.

$$\varepsilon_{rz} = \frac{1}{E^*}(\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad (5)$$

여기서,  $\varepsilon_{rz}$  = 수직방향 회복변형률

$E^*$  = 아스팔트 동탄성계수

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  = 혼합물층 x, y, z방향의 응력

$\nu$  = 아스팔트 포아송비

$$RD = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{p-i} \times \Delta h_i) \quad (6)$$

여기서,  $RD$  = 영구변형량(inch or mm)

$i$  = 아스팔트 층 번호

$n$  = 아스팔트층의 총 개수

$\varepsilon_{p-i}$  = 누적영구변형률

$\Delta h_i$  = 아스팔트 층의 두께(inch or mm)

### 3. 노반용 아스팔트 혼합물 재료시험 및 역학적 특성 분석

#### 3.1 아스팔트 혼합물 재료 특성

노반용 아스팔트 혼합물 사용 재료로 AP-5(침입도 Pen. 60~80, PG 64-22)를 기본바인더로 사용하였다. 골재는 충남 금산군 석산에서 생산된 화강변성암 재질로 ‘가열 아스팔트 혼합물 배합 설계 지침[5]’에서 규정한 표층용 밀입도 19mm혼합물 배합에 사용하도록 제시된 WC-4 골재입도를 모두 만족하는 범위 내에서 결정하였다. 아스팔트 혼합물은 WC-4 국내 규정을 적용하였고, 시편의 크기는  $D=100\text{mm}$ ,  $H=75\text{mm}$ 로 마샬 및 선회다짐시험기를 사용하여 제작하였다.

마샬 안정도 실험은 KS F 2337 기준에 따라 실시하였고 시험 방법은 원통형 공시체 5개를  $60^\circ\text{C}$ 의 온도에  $50\text{mm}/\text{min}$ 의 속도로 공시체 파괴시까지 압축 하중을 가하여 마샬 안정도와 흐

를치를 측정하였다. 간접인장시험은 마샬 안정도 시험과 같은 공시체 및 하중재하 속도를 사용하였으며, 25℃의 온도로 시험하였다. 시험 결과는 Fig. 1과 같이 도로포장 밀입도 혼합물(WC-4) 기준치(국내:750kgf, 독일:800kgf, 일본:500kgf) 보다 크게 평가되었다. 따라서 단순 비교시 본 연구에서 배합설계하여 제작된 혼합물은 노반용으로 사용 가능한 것으로 판단된다. 또한 수분손상이 염려되는 곳에서는 잔류인장강도가 75%이상 확보되어야 한다.

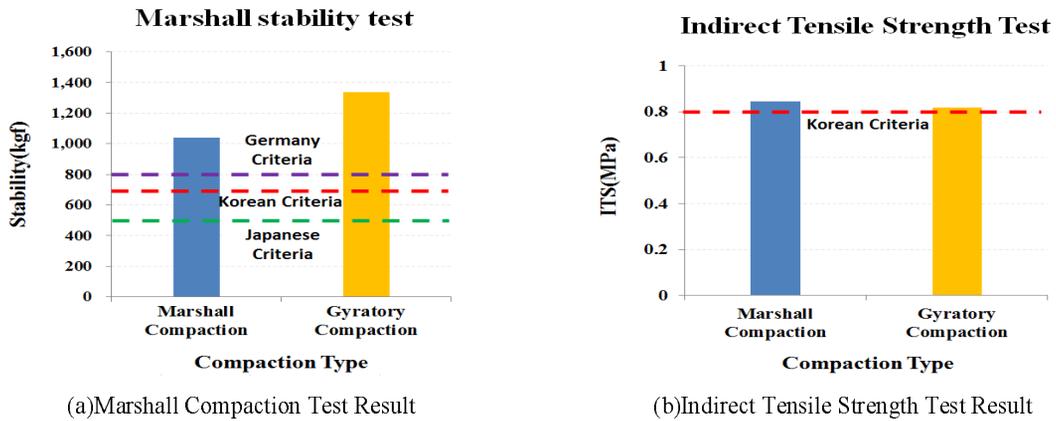
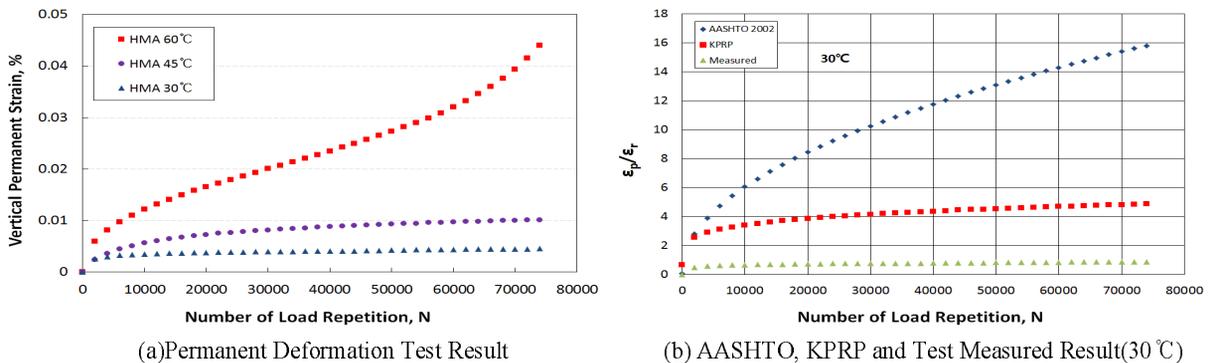
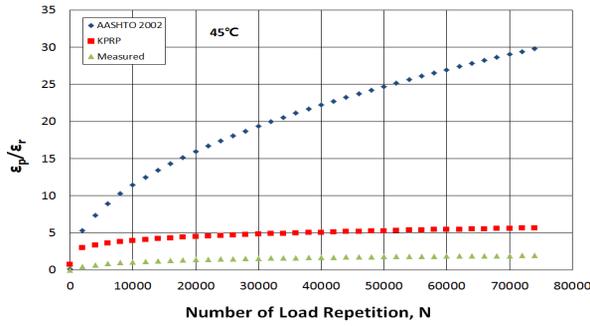


Fig. 1 Asphalt mixture Mechanics Test Results

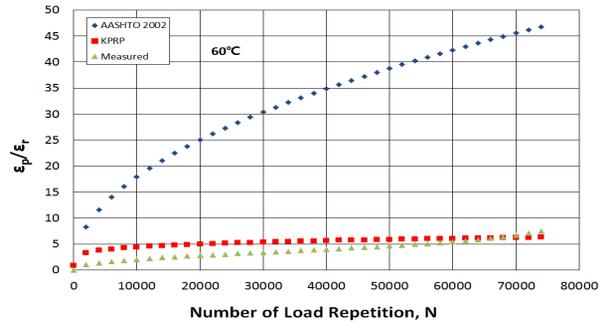
### 3.2 영구변형 시험 결과와 예측식 비교

영구변형 시험용 시편은 D=70mm, H=100mm의 원통형으로 제작하였고 NCHRP Report 465에 나온 반복삼축시험 방법을 이용, 차량 바퀴간격을 고려하여 0.1초의 재하기와 0.9초의 휴지기를 갖도록 Haversine파를 재하 하였다. 하중조건은 구속압을 138kPa, 축응력은 370kPa로 하였다. 시험 결과 Fig. 2(a)와 같이 온도 60℃에서는 흐름점이 분명히 확인되었으나, 30℃, 45℃에서는 50,000회 이상 시험이 진행되어도 영구변형률의 안정된 값(수직영구변형률 : 30℃=0.5%, 45℃=0.1%)을 유지하며 전단에 의한 영구변형이 발생하지 않은 것으로 판단되었고 압밀에 의한 변형만 관찰할 수 있었다. Fig. 2(b), (c), (d)는 AASHTO 2002 및 한국형 포장설계법에서 각각 제시한 영구변형 예측모델과 본 연구에서 시행한 밀입도 19mm 혼합물 시편( $V_a = 3\%$ )에 대한 반복삼축압축시험으로부터 획득한 영구변형시험결과를 비교 및 분석한 결과이다. AASHTO 2002예측식은 KPRP 및 본 연구에서 시행한 반복시험결과에 비해 매우 크게 평가되는 것을 알 수 있다.





(c) AASHTO, KPRP and Test Measured Result(45°C)

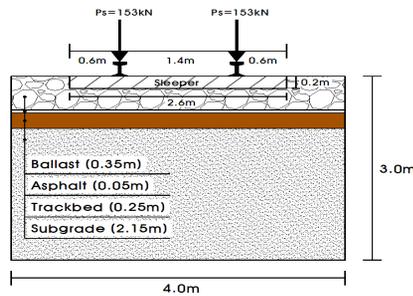


(d) AASHTO, KPRP and Test Measured Result(60°C)

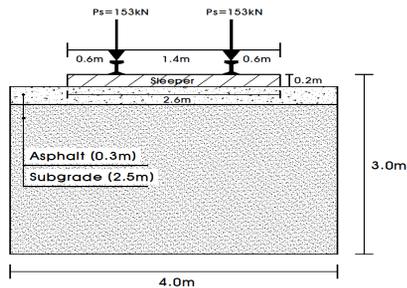
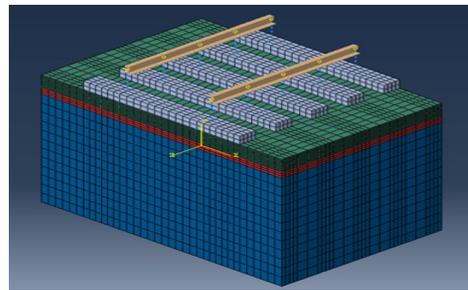
Fig. 2 Compared Permanent Deformation Prediction: AASHTO, KPRP and Measured Test Results

### 3.3 수치해석에 의한 아스팔트 노반층 내 응력조건 산정

아스팔트 궤도에 대한 구조해석을 위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 유한요소망의 구성은 Fig. 3, 부재 및 궤도구성 요소별 사용재료의 재료물성은 Table 2와 같다.



(a)Asphalt Slab Track Modeling and Finite Element Mesh



(b)Ballast Asphalt Track Modeling and Finite Element Mesh

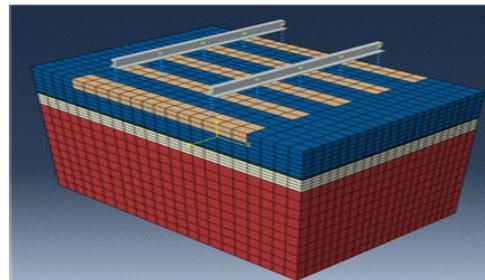


Fig. 3 3D Finite Element Analysis Modeling and Mesh

작용하중은 레일당 윤중 157kN이며 모든 궤도 구성층은 선형 탄성거동을 하는 것으로 가정하였다. 또한 유도상 및 아스팔트 직결궤도로 구별하였고 레일은 beam, 패드는 Spring, 침목 및 노반은 각각 Solid요소로 해석하였다.

Table 1 Asphalt Track Properties of ABAQUS FEA Model Input and Material Parameters

Element		Rail	Pad	Sleeper	Ballast	Asphalt	Trackbed	Subgrade
$\rho(\text{ton}/\text{m}^3)$		7.8	-	2.3	2.0	2.3	2.0	2.0
Elastic Model	E	210GPa	40kN/mm	29.1 GPa	100 MPa	3 GPa	180 MPa	125 MPa
	$\nu$	0.3	-	0.2	0.2	0.35	0.2	0.3

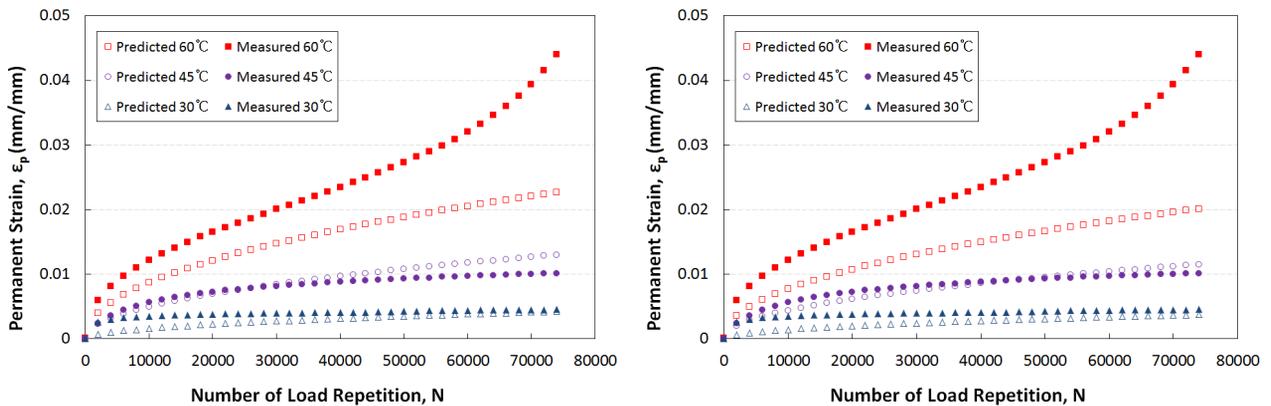
탄성체로 가정한 유한요소 해석으로부터 아스팔트 영구변형 예측을 위해 사용할 아스팔트 노반층 내의 응력조건을 구하였다. 획득된 응력은 Table 3과 같다.

**Table 2** Calculated Stresses for Asphalt Trackbed

Division	Asphalt Slab Track(kPa)			Ballast Asphalt Track(kPa)		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$
Stress Result	17.80	235.60	14.30	15.11	74.10	14.48

식 (5)를 이용하여 탄성변형률 계산시, 사용 온도를 고려하여 아스팔트노반층의 탄성계수를 ( $30^\circ\text{C} = 2\text{GPa}$ ,  $45^\circ\text{C} = 1\text{GPa}$ ,  $60^\circ\text{C} = 0.8\text{GPa}$ )결정하였으며 이를 해석에 사용하였다.

다음 Fig. 4는 AASHTO 2002 영구변형 예측식(식 (4))과 유도상 및 직결아스팔트궤도에 대하여 유한요소해석으로 구한 응력을 활용하여 계산된 영구변형률 예측결과를, 반복삼축시험으로부터 획득한 영구변형 측정결과와 비교한 것이다. 각 온도대역별로 비교시  $30^\circ\text{C}$ 에서 영구변형률은 시험 값이 예측 값에 비해 다소 큰 결과를 보였으나 반복제하횟수가 증가할수록 비슷한 값을 도출하는 것을 확인하였다. 하지만 반복삼축시험의 경우, 실제 혼합물이 받는 응력조건을 정확히 모사하지 못한 채 단순 가정하여 적용하였으므로 직접 비교는 다소 무리가 있을 수 있다.



(a) Compared Asphalt slab track  $N - \epsilon_p$  with Temperature

(b) Compared Ballast Asphalt track  $N - \epsilon_p$  with Temperature

**Fig. 4** Compared permanent deformation Predicted by AASHTO and FEA Result ( $N - \epsilon_p$ )

### 3.4 동탄성계수 변화값을 이용한 설계수명에 따른 영구변형량 산출

Table 3은 동탄성계수변화를 반영하여 AASHTO2002식에 근거, 설계수명(내용년수)별 영구변형률을 산출, 비교한 것이다. 이는 설계수명 동안 일정 온도가 지속되는 상황을 상정하여 계산된 결과로서 실 설계상황과는 차이가 난다. 그러나 아스팔트 혼합물층의 온도가  $60^\circ\text{C}$ , 설계수명이 60년일지라도 전체 예상 영구변형량은 체결구 조정가능량인 5mm의 50% 정도인 2.45mm에 불과함을 알 수 있다.

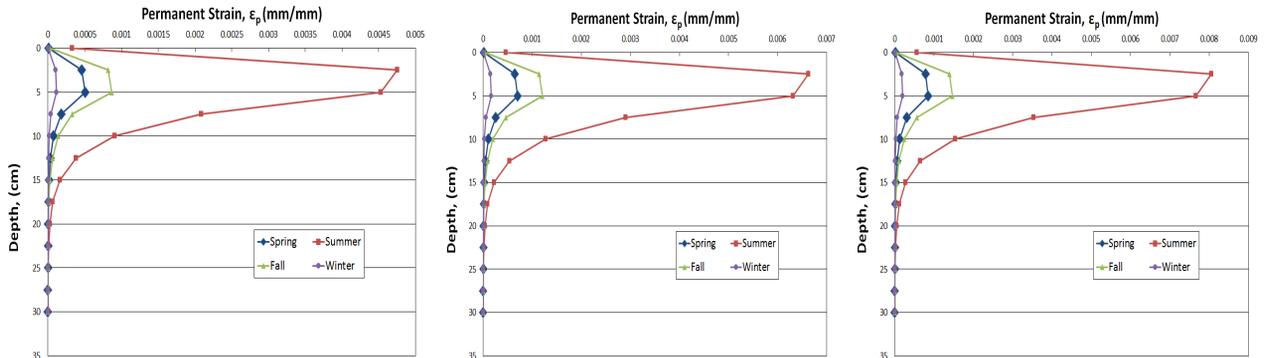
**Table 3** Predicted permanent deformation with change of temperature at the end of design life

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

아스팔트 노반층의 동탄성계수를 계절별 대표 값으로 설정하여 유한요소해석을 실시하고 이로부터 아스팔트 노반층의 수직응력을 구하였다. Table 4는 구조해석을 위한 아스팔트 계절별 동탄성계수와 그에 상응하는 대표 온도를 정리한 것이다. Fig. 5는 계산된 수직응력과 이에 대응하는 동탄성계수를 활용하여 아스팔트 직결궤도의 노반층 예상 깊이별 영구변형률 발생패턴을 재산출한 것이다.

**Table 4** Seasonal temperature and dynamic elastic modulus

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



(a) Permanent deformation for 20 years      (b) Permanent deformation for 40 years      (c) Permanent deformation for 60 years

**Fig. 5** Expected permanent strain variation with depth of asphalt trackbed at representative dynamic modulus

앞서 설명한 바와 마찬가지로 영구변형량은 세분화시킨 층 두께와 각 층별로 산정된 영구 변형률( $\epsilon_p$ )을 곱한 후 이를 모두 더하여 계절별 영구변형량을 구한다. 이와 같은 영구변형량 산출을 위해서는 아스팔트 노반층의 계절별 대표 동탄성계수와 설계수명에 해당하는 반복재하횟수를 먼저 산출하여야 한다. 영구변형량에 입각하여 아스팔트 노반의 설계수명(내용년수) 결정을 위한 절차는 [6]에 상세히 소개되어 있다. 이때 영구변형량 결정요소로는 (1) 각 계절별 아스팔트 혼합물의 동탄성계수( $E^*$ )와 (2) 흙노반의 탄성계수( $E_s$ ), (3) 윤중(P), (4) 연간통과톤수(MGT) 및 (5) 재하횟수(N) 등이 반영된다.

다만, 침목 하면 직결레도 아스팔트 노반층의 접지압(약 450kPa)이 아스팔트 도로포장설계시 사용하는 타이어 접지압(680kPa)보다 작기 때문에 예상 영구변형량(RD)은 예측방법에 의한 산출 값보다 작을 것으로 예상된다. 내용년수(설계수명)에 해당하는 반복재하회수 N은 식(7)을 이용해 구한다.

$$N = \frac{MGT \times (20,40,60Year) \times \Delta p}{4 \times P} \quad (7)$$

여기서, MGT = 연간통과톤수(10,000,000ton),  $\Delta p$  = 변동 윤중(10kN), P = 윤중(KTX =153kN)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 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 레도의 부설 시 발생 가능한 영구변형량을 추정하였다. 이를 위해 유한요소해석을 실시, 레도 깊이 별 발생응력을 산출한 후 공용중 발생 가능한 영구변형량을 계산할 수 있었다. 예측된 소성침하량은 극미하여, 공용중 침하에 대한 내구성 확보가 가능한 것으로 판단되었다..

#### 후 기

이 논문은 한국철도기술연구원 “철도건설 및 운영비 절감을 위한 경제성 향상 기술개발” (고속화에 대응한 철도 아스팔트 노반 및 레도구조 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] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2011) *Korea Pavement Research Program*.
- [3] C. L. Monismith, N. Ogawa, C. R. Freeme (1975) Permanent Deformation Characteristics of Subgrade soils due to Repeated Loading, *Transportation Research Record*, (537), pp. 1-17.
- [4] R. B. Leahy (1989). Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete, PhD Dissertation, University of Maryland.
- [5] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2005) *Hot mix asphalt design guidelines* .
- [6] 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.