

한국형 포장 설계법 모형을 이용한 소성변형 모형 검증 연구

Validation of Rutting Model of Asphalt Mixtures Using Model of Korea pavement Research Program

최태준*·이현종**·서영찬***·한승환****·박희문*****

Choi Tae Joon·Lee, Hyun Jong·Suh Young Chan·Han Sung Hwan·Park Hee Mun

1. 서론

아스팔트 혼합물의 파손모형은 역학적-경험적 포장설계에서 포장의 수명을 결정하는 중요한 요소이다. 아스팔트 혼합물의 파손모형과 관련된 연구는 AASHTO를 비롯 1960년대부터 지속적으로 많은 연구자들에 의해 진행되어오고 있다. 1980년대까지만 해도 대부분의 아스팔트 혼합물의 파손모형은 많은 시험데이터를 회귀분석한 경험적 파손모형이 대부분을 이루었으나 1990년대 이후부터 역학적 이론에 바탕을 둔 다양한 파손모형들이 제시되고 있다. 유럽의 경우 대부분의 국가에서 자체적으로 역학적-경험적 설계법을 개발하여 사용하고 있으며, 유럽의 단일화된 설계법을 개발하기 위해 연구를 진행하고 있다. 미국의 경우 2002년에 역학적-경험적 설계방식의 AASHTO 2002 설계법을 개발하였고 현재 검증 및 보완 작업이 진행 중에 있다. 우리나라의 경우 한국건설기술연구원과 한국도로공사가 주관으로 2000년부터 한국 자체의 역학적-경험적 설계법을 개발하고 있다. 본 연구는 한국형 포장설계법 개발의 세부과제인 아스팔트 파손모형개발의 연구 중 개발된 아스팔트 혼합물의 소성변형 모형을 최근 한국건설기술연구원에서 새롭게 제시한 아스팔트 혼합물의 소성변형 모형과 APT시험자료와 AASHTO모형을 통하여 검증 및 보정계수 개발을 소개하는 것이다.

2. 한국형 포장 설계법 모형을 이용한 소성변형 모형 검증

2.1 개요

기존의 소성변형 모형은 기본적으로 APT데이터와 현장 공용성 데이터만으로 산정한 것이다. 또한 표층과 기층에 동일한 모형계수를 적용한 결과였다. 하지만 최근 한국건설기술연구원에서 각 혼합물에 대한 실내 소성변형 시험을 표 1의 조건으로 완료하여 표 2와 소성변형 모형 식 (1)을 제시하였기 때문에 기존 소성변형 모형의 재검증을 수행하였다.

표 1. 3축 압축 반복재하시험의 시험조건

구속하중	138kpa(20psi)	1종류
축하중	551kpa(80psi), 827kpa(120psi)	2종류
온도	45℃, 60℃	2종류
공극률	시험 종류에 따라 개별측정	2종류
재하하중 종류	0.1초 재하, 0.9초 휴지기 (Haversine파)	1종류
최대 하중재하 횟수	20,000회	1종류

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 석사과정 · 02-2205-3812(E-mail : matina79@nate.com)

** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · 02-3408-3812(E-mail:hlee@sejong.ac.kr)

*** 정회원 · 한양대학교 교통공학과 정교수 · 공학박사 · 031-419-0552(E-mail : suhyc@hanyang.ac.kr)

**** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 선임연구원 · 공학박사 · 02-371-3365(E-mail : hansu@ex.co.kr)

***** 정회원 · 한국도로건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사 · 031-910-0323(E-mail : hpark@kict.re.kr)



표 2. 아스팔트 혼합물별 모형계수

혼합물	a	b	c	d
13mm+AP3	0.320	0.153	-0.382	0.926
13mm+AP5	1.538	0.148	-0.829	0.482
19mm+AP3	0.847	0.188	-0.527	0.618
19mm+AP5	1.107	0.185	-0.708	0.688
SMA+AP3	0.807	0.149	-0.441	0.571
SMA+AP5	1.484	0.159	-0.603	0.116
19mm+SBS	1.328	0.151	-0.583	0.111
25mm+AP3	0.807	0.149	-0.441	0.571
25mm+AP5	1.484	0.159	-0.603	0.116

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = \beta_1 a N^{\beta_2 b} T^{\beta_3 c} A V^{\beta_4 d} \quad \text{식 (1)}$$

여기서, β_i = 보정계수

2.1.1 소성변형 모형 검증

본 연구에서는 APT 시험 및 현장 공용성 확보에 대한 한계가 있기 때문에 표 2에 제시된 모든 혼합물에 대한 보정계수를 산정하기는 어렵다. 따라서, 현재 국내현장에서 가장 많이 적용되는 19mm 밀입도 골재에 AC 60~80의 아스팔트 바인더를 적용한 표층 혼합물과 25mm 밀입도 골재에 AC 60~80의 아스팔트 바인더를 적용한 기층 혼합물에 대한 보정계수만을 산정한다. 그 밖의 다른 혼합물의 경우에는 현장 데이터를 사용한 보정은 실시하지 않고, 실내시험을 통해 산정된 혼합물간의 상대적인 소성변형량을 참고하여 보정계수를 산정하는 것으로 계획하고, 표 2를 검증하기 위해서 기존에 수행했던 포장가속시험(APT)와 Kenlayer 구조해석을 이용하였다.

포장가속시험(APT)은 일정한 하중과 동일한 온도에서 실시하는 시험이므로 계절의 변화가 고려되지 않고 교통량(재하하중)의 시간에 따른 변화도 고려할 수 없기 때문에 한국형 포장설계법(KPRP) 프로그램을 사용하여 검증을 할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 포장 가속시험에 적용된 포장단면에 대하여 구조해석을 수행하여 각각의 층에서 발생하는 회복 변형률(ϵ_r)을 계산한 다음 이를 아스팔트 소성변형 모형에 적용하여 아스팔트층의 소성변형량을 예측하였다.

식 (1)에서 연직 방향 회복변형률(ϵ_r)을 구하기 위해 구조해석 프로그램 Kenlayer를 사용하였으며, 해석에 적용된 입력변수들을 정리하면 표 3과 같다. 구조해석에 사용된 하중은 APT 시험의 10ton의 설정된 재하하중에서 실제 적용오차범위 8~10ton을 고려하여 평균값인 9ton을 사용하였다. 아스팔트 기층이 적용된 시험단면의 경우 각 층의 소성변형량을 구하기 위해 표층(5cm)과 중간층(7cm)은 가가의 별개의 층으로 두고 기층(18cm)은 두께 6cm의 3개의 세부층으로 분할하였고, 보조기층(30cm)과 노상(140cm)은 각각 단일 층으로 구분하였다.

표 3. Kenlayer 입력 변수

	하중재하	재하반지름	접지압
Kenlayer 입력변수	9 ton	14.8 cm (5.827 in)	6.543 kg/cm ² (93.06 psi)



그림 1은 APT 단면에서 채취한 시편의 Master Curve 이며, 이것을 사용하여 동탄성계수 E^* 값을 입력하였다. Master Curve에서 동탄성계수를 구하기 위해 그림 2와 같이 시험속도(10km/h)에 따른 깊이-주기의 관계를 적용하여 각 단면깊이에 따른 하중주기 산출하였다. 또한, 포장체내에 매설한 온도감지장치 (Thermocouple)로 그림 3과 같이 각 단면 깊이별 온도를 측정하여 깊이에 따른 온도변화도 고려 하였다. 각 세부층 중앙지점의 온도를 사용하여 Shift Factor를 산정한 다음 식 (2)를 통해 Reduced Frequency를 구하고 동탄성 계수를 산정하였다.

$$Reduced\ Frequency = \frac{f}{SF} \quad \text{식 (2)}$$

여기서 ,
 f = 하중주기
 SF = Shift factor

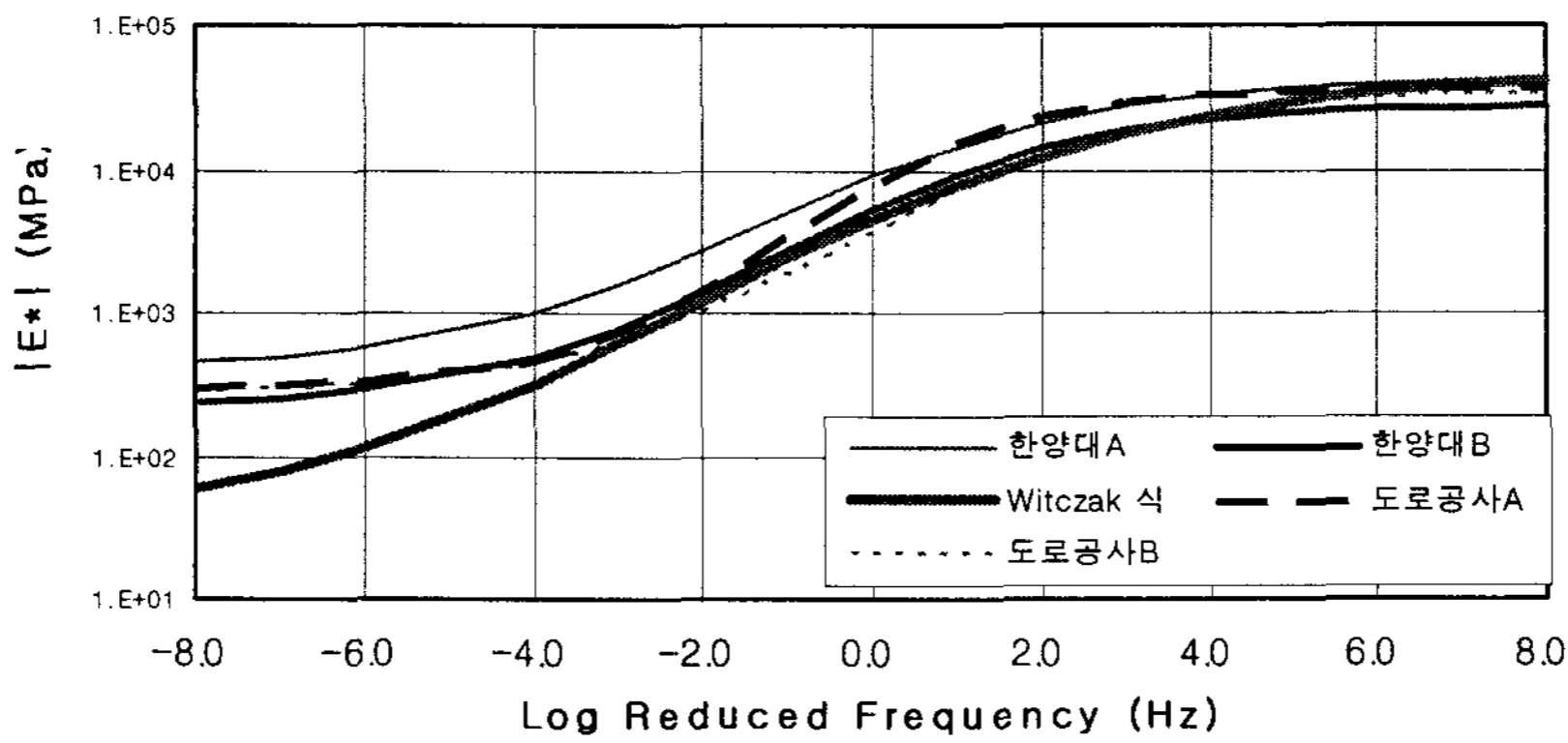


그림 1. 실내실험과 Witzak 모형의 Master Curve

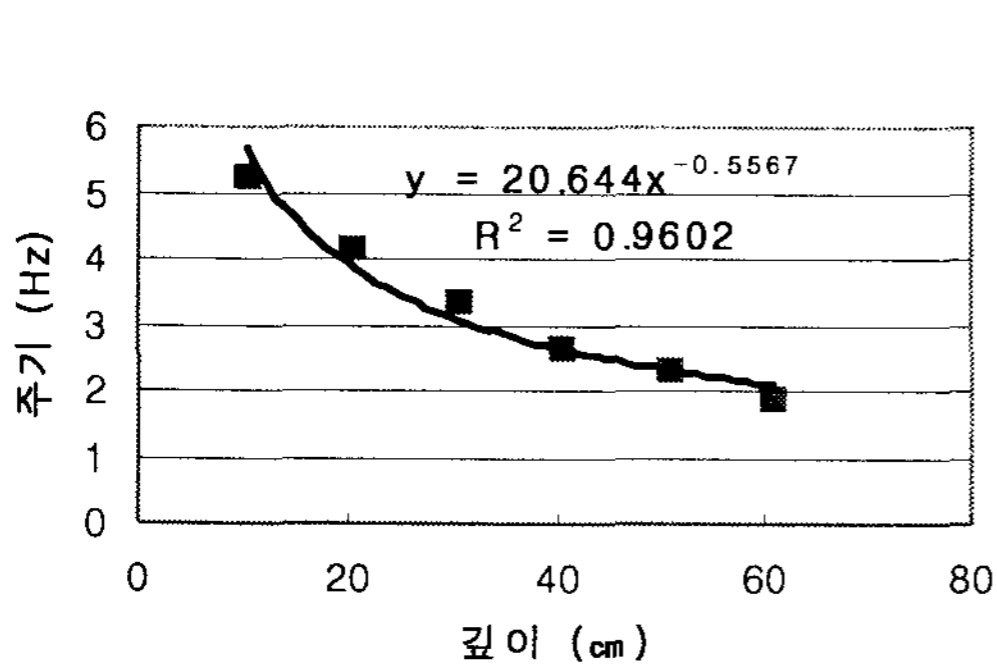


그림 2. 속도에 따른 깊이-주기의 관계

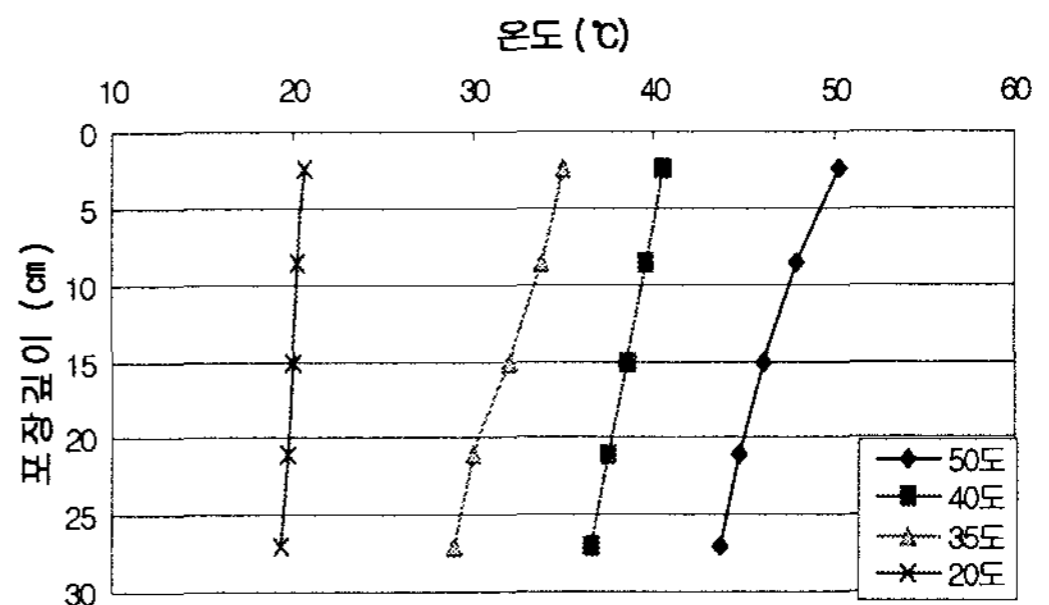


그림 3. 단면 깊이에 따른 포장체 내부온도 변화

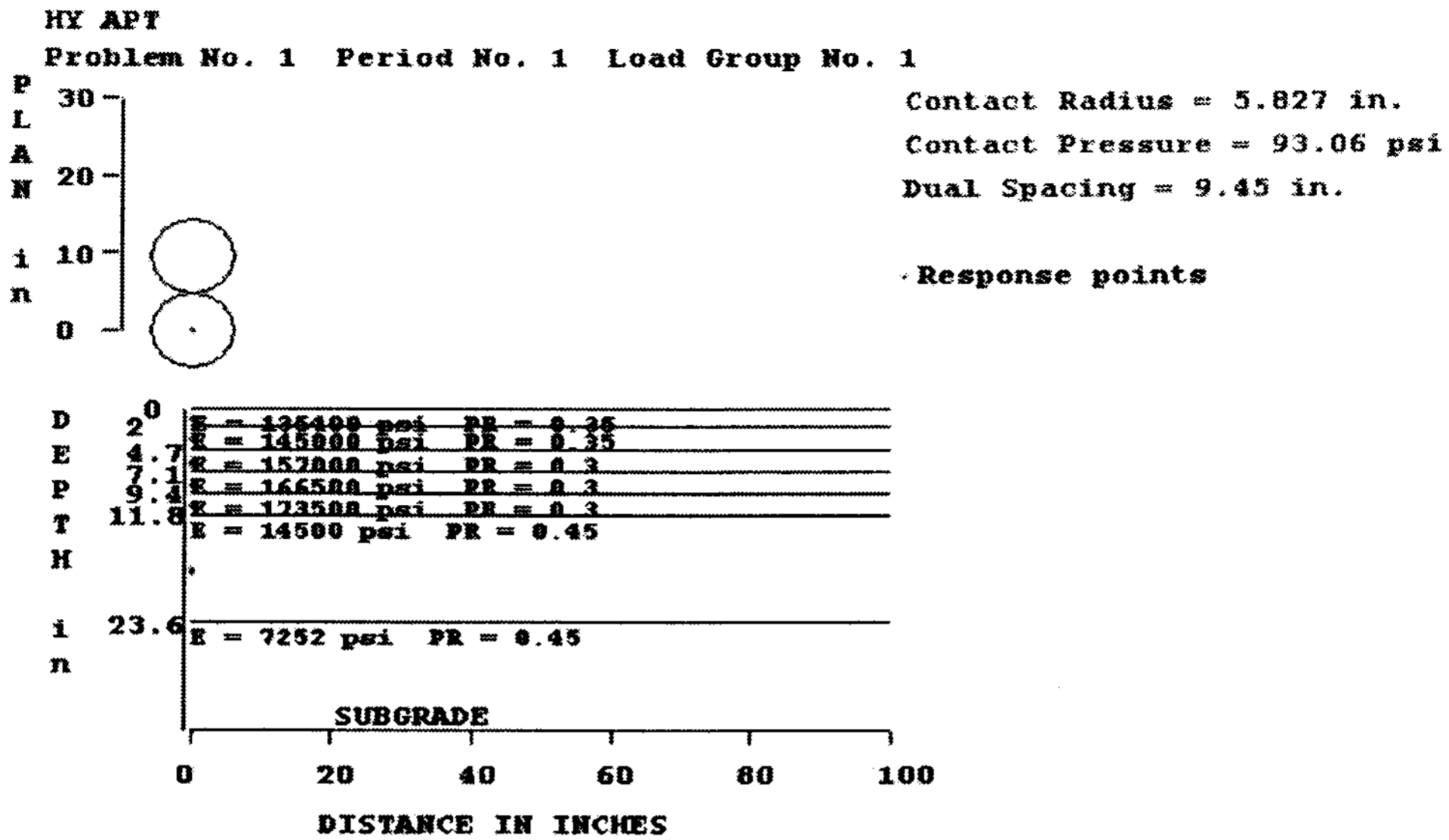


그림 4. Kenlayer 구조해석 프로그램에 적용된 입력값

구조해석과 온도감지장치로부터 얻은 ϵ_r 과 T값을 이용하여 연직방향 소성변형률 ϵ_p 값을 계산한 후 이에 각 층의 두께를 곱함으로써 해당 층에 대한 소성변형량을 개별적으로 산출 하였다. 기층 상부에 매설된 MDD 데이터는 기층 아래 부분에 의한 소성변형량을 계측해주므로 횡단 프로파일에 의해 측정된 표면 처짐량과의 차를 통해 소성변형량을 비교 확인 하였다.

한국건설기술연구원에서 제안한 아스팔트 혼합물 소성변형 모형의 검증 및 보정계수를 구하기 위해서 식 (1) 및 APT 실측값과 AASHTO 2002 Design Guide에서 제시한 아스팔트 혼합물의 소성 변형 모형 식 (3)을 비교 분석하여 1차 보정하였다.

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3.35412} N^{0.4791} T^{1.5606} Kz \quad \text{식 (3)}$$

여기서,

$$Kz = (C_1 + C_2 * depth) * 0.328196^{depth}$$

$$C_1 = -0.1039 * H_{ac}^2 + 2.4868 * H_{ac} - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172 * H_{ac}^2 - 1.7331 * H_{ac} + 27.428$$

H_{ac} = 아스팔트층 전체 두께
 $depth$ = 표면에서부터의 깊이

다음의 그림 5는 식 (1)에 의해 보정 산출된 표층+중간층 및 기층의 소성변형량의 합인 전체 층에 대한 소성 변형량, AASHTO 2002 Design Guide 모형식으로부터 산출된 소성변형량, 그리고 한양대학교의 A, B 단면에 대한 포장가속시험의 실측 데이터를 온도별로 비교하여 도시한 것이다.

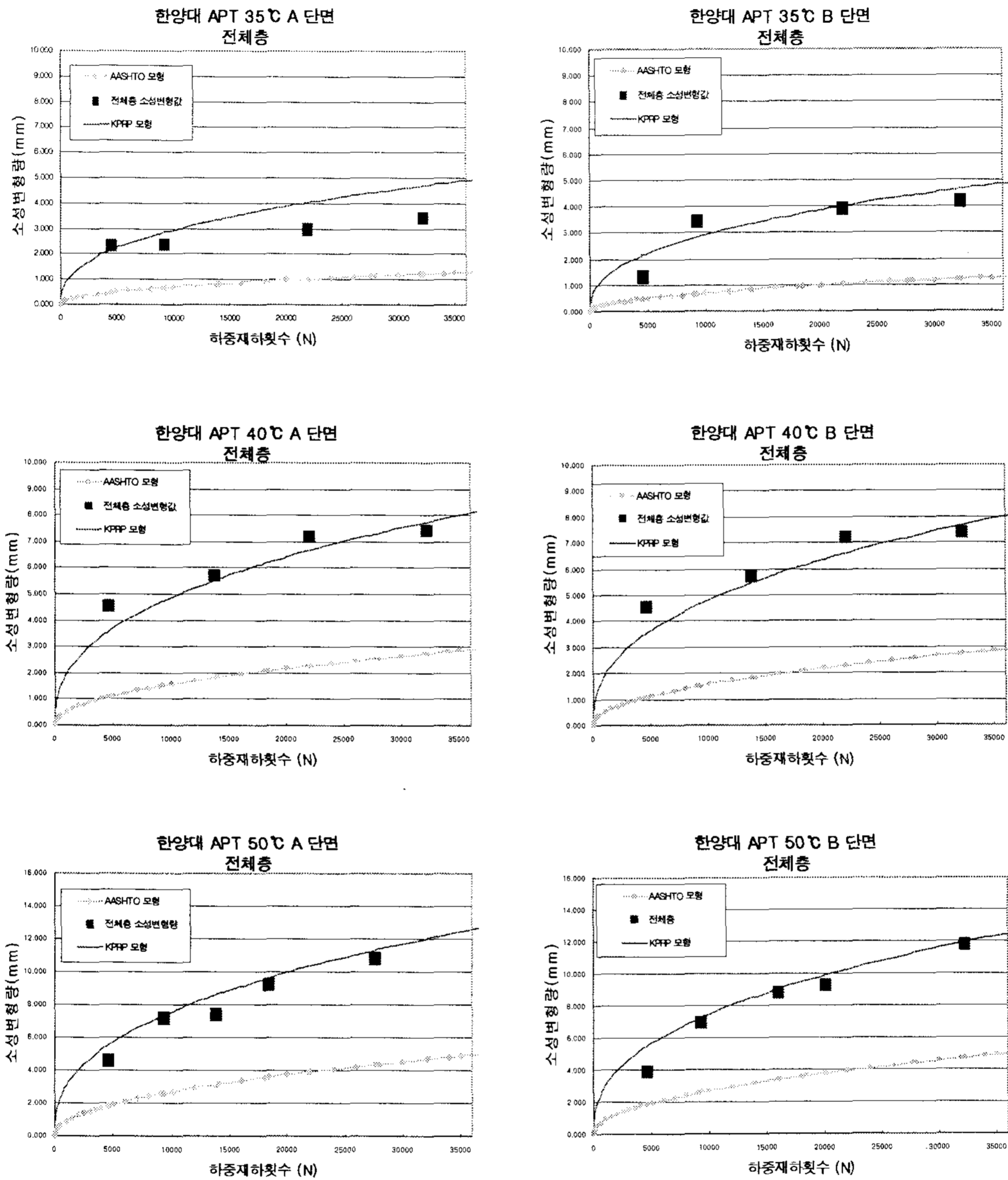


그림 5. 한양대 APT 전체층에 대한 비교

그림 5에서 도시된 바와같이 1차 보정 소성변형 모형계수를 이용하였을 때 한양대 APT 실측 결과값과 KPRP 프로그램의 결과값이 온도의 변화에 관계없이 하중재하횟수에 대한 상당히 유사한 소성변형량을 보여 줌을 알 수 있었다. 반면에 AASHTO 모형에 의한 소성변형량은 온도변화에 관계없이 하중재하횟수에 대해 상대적으로 낮은 소성변형량을 보여주었다.

따라서 전체 한양양대의 2개 단면과 도로공사의 4개 단면에 대한 APT 실측 결과값과 AASHTO 2002 Design Guide 모형과 비교검증한 아스팔트층의 소성변형 모형계수 및 보정계수의 값들을 1차 보정한 최종 결과값은 표 4와 같다.



표 4. 소성 모형계수

	β_1	β_2	β_3	β_4	a	b	c	d
표층	0.897	2.3	1	1	12.794	0.185	-0.708	0.688
기층	0.570	2.3	1	1	30.479	0.159	-0.603	0.116

3. 결론 및 향후 연구과제

아스팔트 포장의 소성변형 모형의 연구결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 한국건설기술연구원에서 각 혼합물에 대한 실내 소성변형 모형 식을 제시하여 기존 APT시험에 불충분했던 소성변형 모형 식을 개선하였다.
- (2) 동일한 하중과 일정한 온도에 대해 실시하는 포장가속시험의 검증을 위해 AASHTO 2002 DG의 소성변형모형을 구조해석을 통하여 비교하였다.
- (3) 포장가속시험의 실측 데이터와 AASHTO 2002 모형을 분석하여 아스팔트 소성변형모형의 1차 보정계수를 산출하였다.

아스팔트층의 소성변형 모형에 대해 포장가속시험의 데이터를 활용하여 보정하였다. 추후, 보조기층과 노상의 MDD 데이터와 더불어 시험도로에서 수집된 데이터를 분석하여 소성변형 모형을 보정하고, 1차 보정 완료된 모형을 도로공사 시험도로의 교통량과 환경하중, 공용기간 등의 분석 데이터와 AASHTO 2002 DG 프로그램 결과값을 비교하여 소성변형 모형의 2차 보정계수를 개발할 계획이다. 이후 국도 LTPP 구간의 현장 데이터를 활용하여 최종 전이함수를 개발하여 소성변형 모형의 개발을 완료할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국형 포장설계법 개발 연구의 일부로 본 연구를 지원하여준 건설교통부 및 한국건설기술연구원, 한국도로공사에 감사드립니다.

참고문헌

1. NCHRP (2002) 2002 Design Guide : Design of new and rehabilitated Pavement structures, NCHRP 1-37A.
2. M.W. Witczak 등 (2002), Simple Performance Test for Superpave Mix Design. NCHRP Report 465, NCHRP
3. Yang H. Huang, (2004), "Pavement Analysis and Design" Pearson Education, Inc.
4. Venkata Kannekanti, John Harvey, (2005), " Sensitivity Analysis of 2002 Design Guide Rigid Pavement Distress Prediction Models " Partnered Pavement Research Center, University of California at Davis
5. ERES Divison of ARA, Inc (2002) " 2002 Design Guide " NCHRP,1-37A
6. 건설교통부 (2007) " 한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 아스팔트 포장 부분 보고서
7. 건설교통부 (2007) " 한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 프로그램 부분 보고서
8. jorn Birgisson, Daniel D. Darku, Reynaldo Roque, Byron E. Ruth, (2001), "Evaluation of mixtures Using Gyrotory Shear Strength Parameters with Superpave Gyrotory Compactors," Presented at the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, Journal Volume 72.