



실내 및 포장가속시험을 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형 모형 개발

Development of Rutting Model for Asphalt Mixtures using Laboratory and Accelerated Pavement Testing

이 상 엄* 이 현 중** 허 재 원*** 박 희 문****
 Lee, Sangyum Lee, Hyun Jong Huh, Jae Won Park, Hee Mun

Abstract

The pavement performance model is the most important factor to determine the pavement life in the mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG). As part of Korean Pavement Research Program (KPRP), the Korean Pavement Design Guide (KPDG) is currently being developed based on mechanistic-empirical principle. In this paper, the rutting prediction model of asphalt mixtures, one of the pavement performance model, has been developed using triaxial repeated loading testing data. This test was conducted on various types of asphalt mixtures for investigating the rutting characteristics by varying with the temperature and air void. The calibration process was made for the coefficients of rutting prediction model using the accelerated pavement testing data. The accuracy of prediction model can be increased when by considering the effect of individual rutting properties of materials rather than shear stresses with depths.

Keywords : *MEPDG, accelerated pavement test, rutting model, triaxial repeated loading test, dynamic modulus, calibration factor*

요 지

포장 공용성 모델은 역학적-경험적 포장설계법에서 포장의 수명을 결정하기 위한 가장 중요한 인자이다. 한국 포장연구 프로그램의 일환으로 한국형 포장설계법이 역학적-경험적 방법이 근거하여 현재 개발중에 있다. 본 연구에서는 포장 공용성 모델중 아스팔트 혼합물의 영구변형 예측모델을 삼축압축 반복재하시험을 이용하여 개발하였다. 본 시험은 다양한 아스팔트 혼합물에 대하여 온도와 공극률을 변화시켜 하중재하 횟수에 따른 혼합물의 영구변형 특성을 조사하였으며, 본 시험결과를 이용하여 예측모델의 계수값을 결정하였다. 영구변형 예측모델의 계수값은 포장가속시험결과를 토대로 다양한 혼합물에 대한 시험결과를 이용하여 깊이에 따른 전단응력의 변화를 고려한 통합적인 소성변형 모델계수값을 정하는 것보다 혼합물의 종류에 따른 모델계수를 산정하는 것이 보다 정확한 결과를 예측할 것으로 판단된다.

핵심용어 : *역학적-경험적 포장설계법, 포장가속시험, 소성변형모형, 삼축압축 반복재하시험, 동탄성계수, 보정계수*

- * 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 연구교수 · 공학박사
- ** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사
- *** 준회원 · 삼성물산(주) 건설부문 · 공학석사
- **** 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사



1. 서론

아스팔트 혼합물의 파손모형은 역학적-경험적 포장설계에서 포장의 수명을 결정하는 중요한 요소이다. 아스팔트 혼합물의 파손모형과 관련된 연구는 AASHTO를 비롯하여 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 NCHRP 1-37A 연구과제의 결과인 역학적-경험적 설계방식의 AASHTO 2002 설계법을 개발하였고 현재 검증 및 보완작업이 진행 중에 있다.

우리나라의 경우 한국건설기술연구원과 한국도로공사가 주관으로 한국형 역학적-경험적 포장설계법을 개발하고 있다. 본 연구는 2000년부터 진행되고 있는 한국형 포장설계법(KPRP) 개발의 세부과제로서 아스팔트 혼합물의 소성변형 모델을 포장가속시험(Accelerated Pavement Test)의 시험자료를 이용하여 검증하고 보정계수를 개발하는 것이다.

2. 삼축압축 반복재하시험을 통한 실내 소성 변형 모형 개발

2.1 시험 방법

실내 소성변형 모형을 개발하기 위하여 한국건설기술연구원에서 각 혼합물에 대해 NCHRP Report 465 "Simple Performance Test for Superpave Mix Design"에서 제안하는 실내 삼축압축 반복재하시험(Triaxial Compressive Repeated Loading

Test)을 수행하였다. 이 시험방법은 시험방법이 비교적 간단하며, 현장의 하중조건과 응력상태를 실내에서 모사할 수 있는 장점이 있다. 소성변형 시험용 시편은 직경 150mm, 높이 170mm의 원통형 시편을 선회다짐기로 제작한 다음 직경 100mm의 시편을 코어채취기로 채취하여 시편 상부 및 하부를 10mm 씩 절단하여 높이 150mm의 시편을 제작하였다. 또한, 하중, 온도, 공극률이 소성변형에 미치는 영향을 파악하기 위해 온도조절용 챔버와 유압장비를 조정하고 데이터를 수집하기 위한 CDAS(Control and Data Acquisition System)으로 구성되어 있는 Servo-Hydraulic Closed Loop 시스템인 IPC사의 UTM-25(2.5ton)를 이용하여 삼축압축 반복재하시험을 실시하였으며 시험조건은 표 1과 같다.

표 1. 삼축압축 반복재하시험의 시험조건

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

2.2 실내 소성변형 모형

다음의 표 2는 실내시험결과 얻어진 아스팔트 혼합물별 소성변형 모형의 모형계수들을 나타내었다. 제시된 혼합물의 모형계수를 이용하여 소성변형 모형을 재검증하기 위해 다음의 식 (1)을 제안하였다.

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

여기서, β_1 = 보정계수

a, b, c, d = 실내시험을 통한 혼합물별 모형계수

N = 하중재하 횟수

T = 온도(℃)

AV = 공극률(%)



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

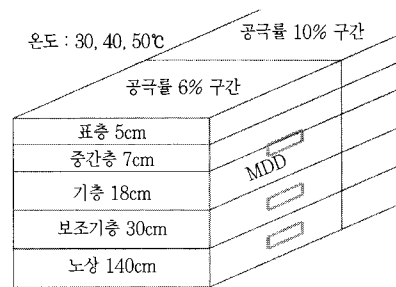
본 연구에서는 APT 시험 및 현장 공용성 확보에 대한 한계가 있기 때문에 표 2에 제시된 모든 혼합물에 대한 보정계수를 산정하기는 어렵다. 따라서, 현재 국내 현장에서 가장 많이 적용되는 19mm 밀입도 골재에 AP3의 아스팔트 바인더를 적용한 표층 혼합물과 25mm 밀입도 골재에 AP3의 아스팔트 바인더를 적용한 기층 혼합물에 대한 보정계수만을 산정한다. 그 밖의 다른 혼합물의 경우에는 현장 데이터를 사용한 보정은 실시하지 않고, 실내시험을 통해 산정된 혼합물간의 상대적인 소성변형량을 참고하여 보정계수를 산정하는 것으로 계획하고, 보정계수 산정을 위해 Kenlayer program의 구조해석과 포장가속 시험(APT)의 결과를 이용하였다.

3. 포장가속시험(APT)을 이용한 소성변형 모형 검증

3.1 포장가속시험(APT) 구간과 재료의 물성

실내시험을 통해 개발된 아스팔트 혼합물의 소성변형 예측 모델의 검증용을 위해 한양대학교와 한국도로공사에서는 포장가속시험(APT)을 실시하였다. 사용된 재료물성은 도로공사의 시험도로 A11 단면과 동일한 포장층 두께와 골재 및 바인더를 사용하였다. 한양대학교에서는 그림 1-(a)와 같은 단면에 6,

10% 두 가지의 목표공극률로 아스팔트층을 시공하였고 정규분포에 따른 자유방식(random)의 원더링(wandering)을 적용하여 35, 40, 50℃의 목표온도에서 시험을 실시하였다. 또한, 기층상부, 보조기층, 노상에 각각 표면으로부터 12cm, 44.5cm, 90.5cm 위치에 MDD를 매설하여 깊이별 소성변형을 측정하였으며, 횡단 프로파일을 통하여 표면 처짐을 측정하였다. 반면, 한국도로공사는 아스팔트 기층 대신 콘



(a) 한양대학교 APT 구간

온도: 35℃ Air Void: 8%

표층(5cm)	표층(5cm)	표층(5cm)
콘크리트층(10cm)	중간층(7cm)	중간층(7cm)
노상(185cm)	콘크리트층(10cm)	기층(18cm)
	노상(178cm)	보조기층(30cm)
		노상(140cm)
section 1	section 2	section 3

(b) 도로공사 Pit-A 구간

온도: 20℃ Air Void: 8, 12%

표층(5cm)	표층(5cm)	표층(5cm)
중간층(7cm)	중간층(7cm)	중간층(7cm)
기층(18cm)	기층(18cm)	기층(18cm)
보조기층(30cm)	보조기층(30cm)	보조기층(30cm)
노상(140cm)	노상(140cm)	노상(140cm)
section 1	section 2	section 3

(c) 도로공사 Pit-B 구간

그림 1. 포장가속시험 시공구간 및 MDD 매설위치



크리트 기층을 타설한 (section 1과 2) Pit-A 단면 그림 1-(b)와 한양대학교와 같은 단면인 Pit-B 그림 1-(c)의 2개의 단면에 대해 각각 35℃와 20℃의 온도에서 APT 시험을 실시하였다. 그림에서와 같이 Pit-A는 목표공극률 8%, Pit-B는 목표공극률을 8%의 section 1구간과 12%의 section 2와 3구간으로 시공하였다. 한양대학교의 시험단면과 마찬가지로 그림 1-(a)와 같은 위치에 Pit-A에는 아스팔트 기층 단면에, Pit-B는 공극률 8% 구간에 각각 MDD(Multi-Depth Deflectometer)를 매설하였다. 각 시험단면에 사용된 혼합물은 기본적으로 동일한 골재입도와 아스팔트 함량으로 구성되어 있고 공극률의 경우 상이하게 계획하였으나 실제로는 표 3에서처럼 거의 유사한 것으로 나타나 모든 단면의 시편은 유사한 혼합물로 여겨진다.

표 3. 한양대학교 및 도로공사 APT 단면의 공극률

공극률	단면	한양대 A	한양대 B	도로공사 Pit A	도로공사 Pit B
목표 공극률(%)		6	10	8	12
APT시공 후 측정된 공극률(%)		7.46	7.30	8.42	8.96

포장가속시험에 사용된 아스팔트 혼합물의 물성 평가를 위해 한양대학교와 도로공사 APT단면에서 코어를 채취하여 공극률과 IPC사의 UTM-25장비를 이용하여 동탄성계수를 측정하였다. 다음 그림 2는 동탄성계수 실내시험 결과 및 Witzczak 모형으로부터 산정한 master curve를 비교한 것이다. 그러나 그림 2에서 보는 바와 같이 동탄성계수는 낮은 주기 영역에서 상당히 큰 차이를 보인다. 따라서 Witzczak(2002)이 제시한 동탄성계수 예측모형으로부터 산정한 동탄성계수와 비교한 결과 한양대 B section의 master curve가 가장 유사한 것으로 나타나 이를 구조해석에 적용하였다. 표 4는 master curve를 작성하기 위한 식 (2)에 제시된 sigmoidal function의 파라미터 값을 나타낸 것이다.

$$\log(E^*) = \delta + \frac{a}{1 + \exp^{\beta + \gamma \log(t_r)}} \quad (2)$$

여기서, $\log(E^*)$ = 로그 함수값의 동탄성계수

δ = minimum modulus(최소값)

a = range of possible value

$\beta + \gamma$ = shape parameter

t_r = reduced time(기준온도에서의 하중재하시간)

표 4. Master curve parameter

	delta	alpha	beta	gamma
도로공사 A-section	2.4969	2.0325	-0.6659	0.8003
도로공사 B-section	2.5010	1.9552	-0.0157	0.7181
한양대 A-section	2.5926	2.0558	-0.6691	0.5123
한양대 B-section	2.3227	2.1296	-0.6648	0.5593

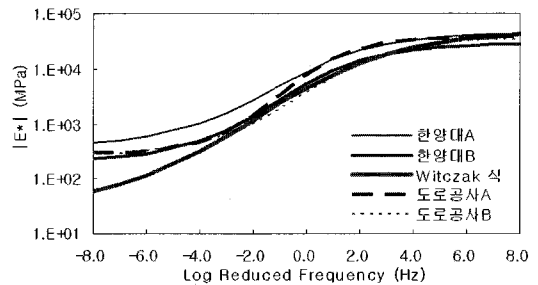


그림 2. 실내시험과 Witzczak 모형의 Master curve

3.2 실내 소성변형 모형검증

포장가속시험은 일정한 하중과 동일한 온도에서 실시하는 시험이므로 포장가속시험에 적용된 포장단면에 대하여 구조해석을 수행하여 각각의 층에서 발생하는 회복 변형률을 계산한 다음 이를 아스팔트 소성변형 모형에 적용하고 아스팔트 층의 소성변형률을 예측하여 일반적인 아스팔트 혼합물의 소성변형 모형식을 검증하였다. 식 (1)에서 연직방향 회복 변형률(ϵ_r)을 구하기 위해 구조해석 프로그램인 Kenlayer를 사용하였으며, 해석에 적용된 입력변수들을 정리하면 표 5와 같다. 구조해석에 사용된 하중은 APT 시험의 10ton의 설정된 재하하중에서 실제 적용오차범위 8~10ton을 고려하여 평균값인 9ton



을 사용하였다. 아스팔트 기층이 적용된 시험단면의 경우 각 층의 소성변형량을 구하기 위해 표층(5cm)과 중간층(7cm)은 각각의 별개의 층으로 두고 기층(18cm)은 두께 6cm의 3개의 세부층으로 분할하였고, 보조기층(30cm)과 노상(140cm)은 각각 단일 층으로 구분하였다.

표 5. Kenlayer 입력 변수

	하중재하	재하반지름	접지압
Kenlayer 입력변수	8~10ton (9 ton)	14.8cm (5.827 in)	6.543kg/cm ² (93.06 psi)

아스팔트층의 동탄성계수는 APT 단면에서 채취한 시편의 master curve 그림 2로부터 구한 동탄성계수 $|E^*|$ 값을 입력하였다. 아스팔트 혼합물의 대표적 물성인 동탄성계수는 온도와 하중재하시간의 함수이며 포장체의 온도와 하중재하시간은 그 단면의 깊이 에 따라서 다른 값을 나타낸다. 또한 하중재하시간은 주기의 함수로 전환되므로 master curve로부터 이를 구하기 위해서는 Huang(2004)이 제시한 포장가속시험기의 시험속도(10km/h)에 따른 깊이-주기의 관계를 적용하여 각 단면깊이에 따른 하중주기를 산출하였다. 또한, 포장체내에 매설한 온도감지장치(Thermocouple)로 그림 3과 같이 각 단면 깊이별 온도를 측정하여 깊이에 따른 온도변화도 고려하였다. 각 세부층 중앙지점의 온도를 사용하여 SF를 산정한 다음 식 (3)을 통해 reduced frequency를 구하고 동탄성계수를 산정하였다.

$$\text{Reduced frequency} = f \times SF \quad (3)$$

여기서, f = 하중주기(Hz)

SF = Shift Factor

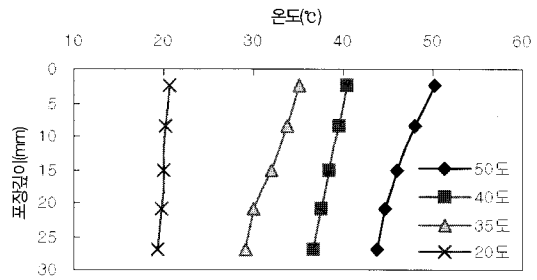
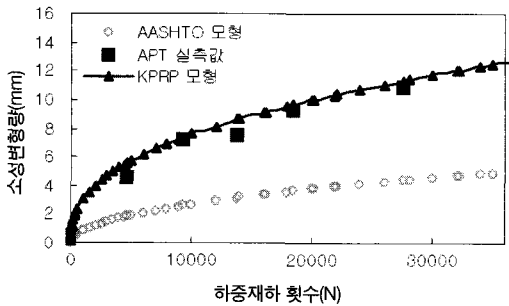


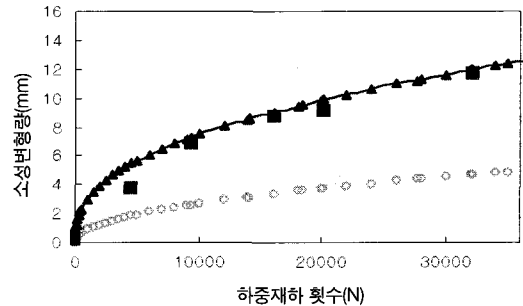
그림 3. 단면 깊이에 따른 포장체 내부온도 변화

아스팔트 기층 대신 콘크리트 기층이 적용된 한국도로공사 시험단면의 경우 아스팔트층 및 쇄석보조기층, 노상은 동일한 물성을 적용하였고, 시멘트 콘크리트 기층의 탄성계수 및 포아송비는 각각 250,000kg/cm²과 0.15를 적용하였다. Kenlayer program을 이용한 구조해석으로 ϵ_p 값을 구하고 온도감지장치를 통해 각각의 포장층 온도(T)를 식 (1)에 대입하여 연직방향 소성변형률 ϵ_p 값을 계산하였다. 계산된 ϵ_p 값과 포장층의 두께를 각각 곱하여 해당 층에 대한 소성변형량을 개별적으로 산출하였다. 기층 상부에 매설된 MDD 데이터는 기층 아래 부분에 의한 소성변형량을 계측해주므로 횡단 프로파일 에 의해 측정된 표면 처짐량과의 차를 통해 각각의 APT단면 소성변형량을 비교하였다. 다음의 그림 4는 식 (1)에 의해 보정 산출된 표층+중간층 및 기층의 소성변형량의 합인 전체 층에 대한 소성변형량과 AASHTO 2002 Design Guide 모형식으로부터 산출된 소성변형량, 그리고 한양대학교의 A, B 단면과 도로공사의 Pit-A단면과 Pit-B단면에 대한 포장가속시험의 실측 데이터를 온도별로 비교하여 도시한 것이다.

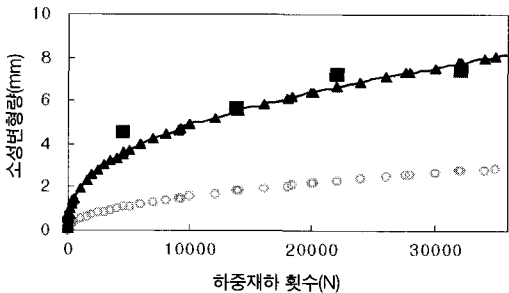
보정된 소성변형 모형계수를 이용하였을 때 한양대 APT 실측 결과값과 실내시험에 의한 소성변형모형의 결과값이 온도의 변화에 관계없이 하중재하 횡수에 대해 상당히 유사한 소성변형량을 보여줌을 알 수 있었다. 도로공사 APT Pit-A단면 중 중간층과 기층 대신 콘크리트층을 시공한 경우(section 1과 2)는 콘크리트층의 소성변형이 발생하지 않는다고



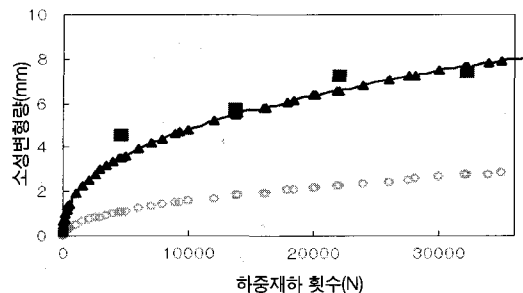
(a) 한양대학교 A단면 (50°C, 전체층)



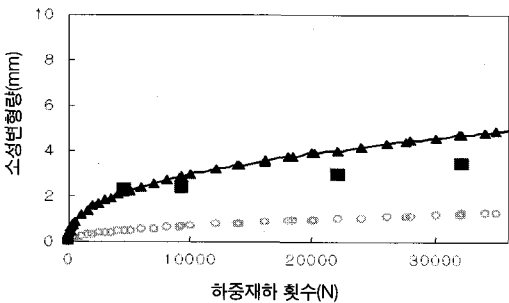
(b) 한양대학교 B단면 (50°C, 전체층)



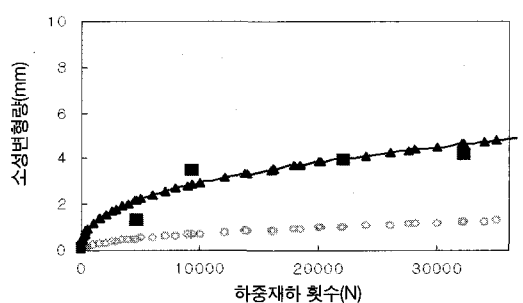
(c) 한양대학교 A단면 (40°C, 전체층)



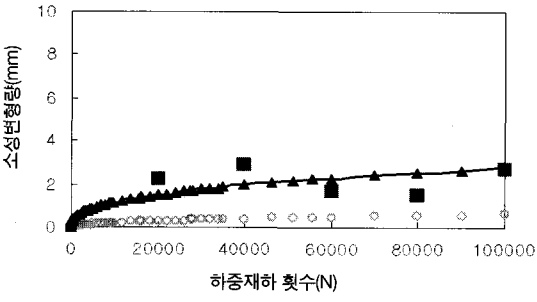
(d) 한양대학교 B단면 (40°C, 전체층)



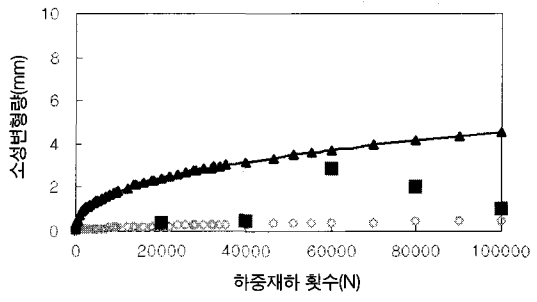
(e) 한양대학교 A단면 (35°C, 전체층)



(f) 한양대학교 B단면 (35°C, 전체층)



(g) 도로공사 Pit A단면 (35°C, 표층+중간층)



(h) 도로공사 Pit B단면 (20°C, 표층+중간층)

그림 4. APT 실측값과 소성변형 모델에 의한 예측값의 비교



가정하고 표면처짐량을 표층의 소성변형량으로 간주 하였지만 아스팔트층의 소성변형결과만을 비교하기 위한 본 연구결과에서는 제외시켰으며 도로공사 APT Pit-B의 공극률 12%의 2개의 단면의 경우 (section 2와 3)는 표면처짐량의 측정오차가 심하여 분석이 불가하였기 때문에 실측 데이터에서 제외시켰다. 도로공사 Pit-A단면의 소성변형 실측값과 예측값의 차이에 비해 Pit-B단면의 차이가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었는데 이는 낮은 온도에서 수행된 APT 시험과 상대적으로 높은 온도에서 수행된 실내시험 모형의 오차로 여겨진다. 반면에 AASHTO 모형에 의한 소성변형량은 온도변화에 관계없이 하중재하 횟수에 대해 상대적으로 낮은 소성 변형량을 보여주었다. 따라서, 다양한 혼합물에 대한 시험결과를 이용하여 혼합물의 종류에 따른 모델계 수를 산정하여 정확한 결과를 예측할 수 있었으며, 전체 한양대학교와 도로공사의 시험단면에 대한 APT 실측 결과값과 AASHTO 2002 Design Guide 모형과 비교검증한 아스팔트층의 소성변형 모형계수 및 보정계수의 값들을 다음의 표 6에 나타 내었다.

표 6. 소성변형 모형계수 및 보정계수

구분	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

3.3 AASHTO 모형과의 비교

3.3.1 포장깊이에 따른 전단응력의 영향을 고려한 소성변형 모형 검증

포장가속시험은 일정한 하중과 동일한 온도에서 실시하는 시험이므로 포장가속시험에 적용된 포장단 면에 대하여 구조해석을 수행하여 각각의 층에서 발생되는 회복 변형률을 계산한 다음 이를 아스팔트 소 성변형 모형에 적용하고 아스팔트 층의 소성변형량 을 예측하여 일반적인 아스팔트 혼합물의 소성변형

모형식을 검증하였다. 다음 식 (4)는 AASHTO 2002 Design Guide에서 제시한 아스팔트 혼합물의 소성변형 모형이다. AASHTO 모형은 다음에서 제 시될 KPRP 모형과 같이 하중재하 횟수(N)항과 온 도(T)항을 고려하였으나, 공극률(AV)항 대신 깊 이계수(K_z)을 사용하였으며 깊이계수는 다음과 같 이 계산된다.

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3.35412 N^{0.4791} T^{1.5606} K_z} \quad (4)$$

여기서, $K_z = (C_1 + C_2 \times depth) \times 0.328196^{depth}$

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

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

H_{ac} = 아스팔트층 전체 두께 (inch)

$depth$ = 표면에서부터의 깊이 (inch)

식 (4)에 의해 산출된 표층과 중간층의 소성변형 량과 실내시험 모형을 통해 얻은 소성변형량, 그리고 포장가속시험의 실측 데이터를 비교하여 함께 그래 프에 나타내었다. 표층의 모형계수만을 적용하여 전 체 아스팔트층의 소성변형량을 예측한 AASHTO 모 형의 결과값과 포장가속시험의 실측 데이터를 비교 하였을 때 그림 5-(a)에서와 같이 예측값의 차이는 있으나 전반적으로 소성변형의 경향이 유사하게 나 타났다.

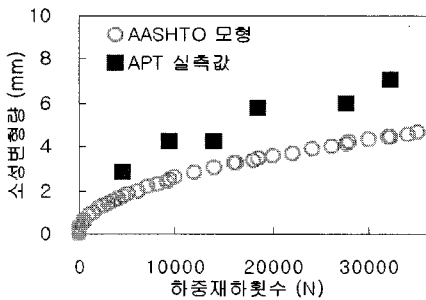
반면에 그림 5-(b)에 나타난 바와 같이 기층부 분에서의 AASHTO 소성변형량은 측정값과 비교하여 매우 낮았다. 이는 포장층 깊이에 따라 깊이계수(K_z)가 상당히 작게 고려되었기 때문이다. 즉, 그림 5-(c)에 의하면 AASHTO 모형의 깊이계수 비율값이 포장체의 깊이 약 2in(5cm)정도에서 최대값을 나타 내고 기층부에는 매우 작은 값을 나타낸다. 깊이계수 를 고려하여 비교를 해보면 AASHTO 모형의 최대 및 최소 깊이계수의 차이는 매우 크고 이로 인해 기 층부의 소성변형이 크게 감소됨을 알 수 있었다. 또 한, 구조해석을 통한 각 단면의 실제 전단응력분포를 보면 포장깊이 약 7in(17cm)지점에서 최대 전단응



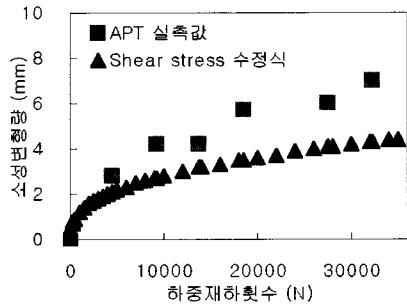
력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이에 근거하여 KPRP의 소성변형 모형에서는 전단응력을 고려한 깊이계수 K_z 에 대한 수정식을 적용하여 실측값과 비교분석하였다. 깊이계수는 포장의 깊이에 따른 구속응력 및 전단응력의 효과를 고려하기 위한 것으로 포장의 깊이별 발생하는 전단응력을 최대 전단응력으로 나누어 전단응력 수정식에 의한 깊이계수와 AASHTO의 깊이계수를 normalization시킨 후 비교하였다. 이러한 전단응력 개념을 적용한 전단응력

수정식 모형의 소성변형 예측결과는 그림 6의 (a)와 (b)에 나타나 있다.

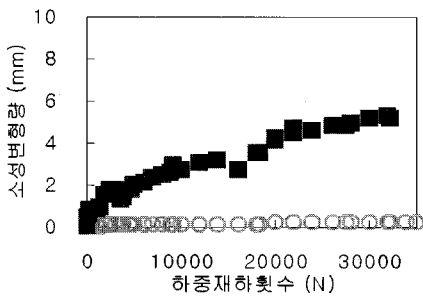
그림 6의 (a)와 (b)로부터 소성변형 예측은 실측값과 비교할 때 표층과 중간층은 과소하며 기층의 경우는 과다한 것을 알 수 있었다. 비록 전단응력 개념을 사용한 소성변형 예측결과가 AASHTO 모형을 이용한 소성변형 예측결과보다는 개선이 되었지만 부분적인 보정이 필요하다는 것을 알 수 있다. 즉, 표층은 조금 더 크게, 기층은 더 작게 예측하기 위해 전단응



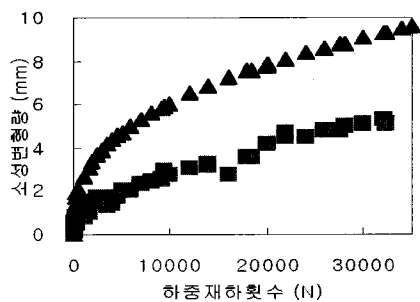
(a) 표층+중간층



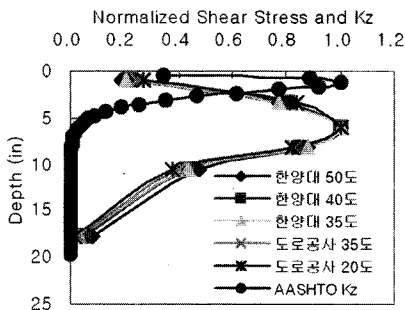
(a) 표층+중간층



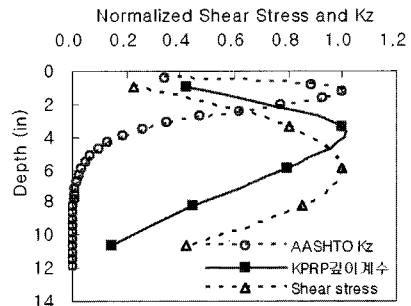
(b) 기층



(b) 기층



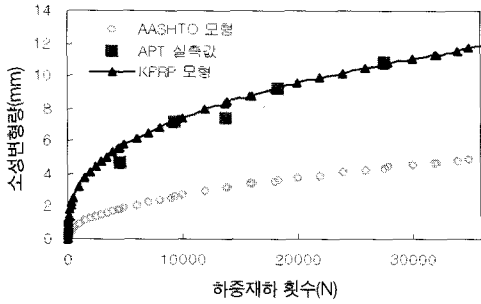
(c) 깊이계수 비율



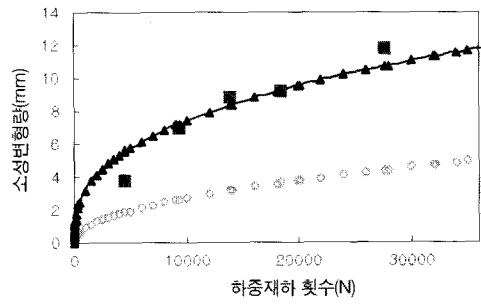
(c) 모형별 깊이계수 비율

그림 5. APT 실측값과 AASHTO 소성변형 모형 예측값의 비교

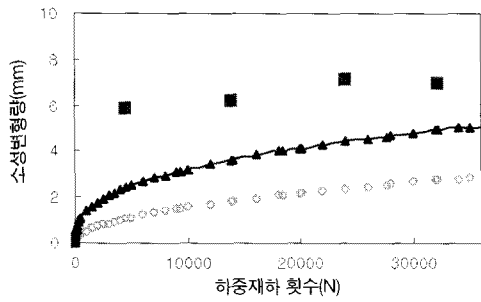
그림 6. APT 실측값과 전단응력 수정식을 적용한 소성변형 모형 예측값의 비교



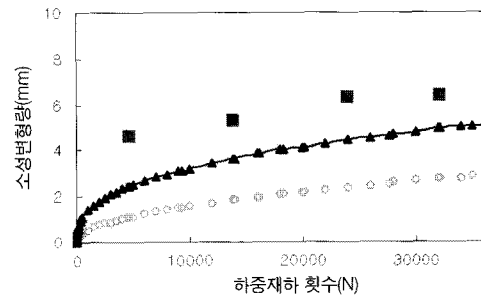
(a) 한양대학교 A단면 (50°C, 전체층)



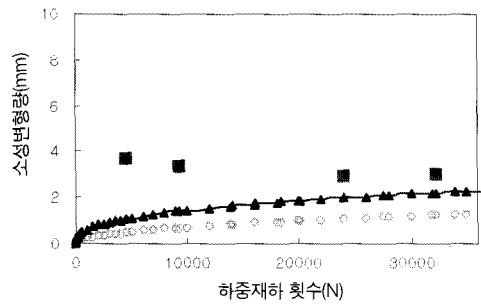
(b) 한양대학교 B단면 (50°C, 전체층)



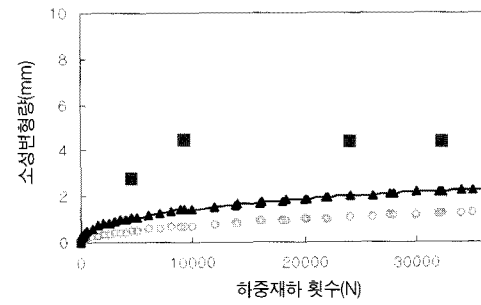
(c) 한양대학교 A단면 (40°C, 전체층)



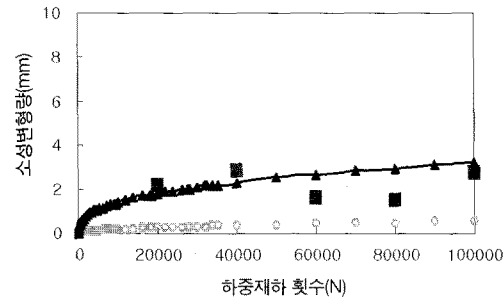
(d) 한양대학교 B단면 (40°C, 전체층)



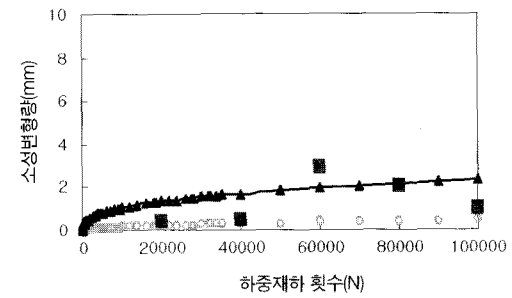
(e) 한양대학교 A단면 (35°C, 전체층)



(f) 한양대학교 B단면 (35°C, 전체층)



(g) 도로공사 Pit A단면 (35°C, 표층+중간층)



(h) 도로공사 Pit B단면 (20°C, 표층+중간층)

그림 7. APT 실측값과 소성변형 모형에 의한 예측값의 비교



력 그래프를 위로 이동시켜야 한다는 것이다. 전단응력의 개념을 보완한 KPRP 깊이계수의 산정을 위해 포장체내에 작용하는 구속응력 및 전단응력 수정식의 깊이계수를 그림 6-(c)와 같이 위로 이동시킨 후에 식 (5)의 포장체 깊이에 따른 전단응력과 깊이계수와의 관계식인 KPRP 깊이계수를 결정하였다.

$$Kz = \frac{\tau}{\tau_{max}} (a_1 \times e^{a_2 \times \frac{z}{H_{ac}}}) \quad (5)$$

여기서, Kz = KPRP 소성변형 모형의 깊이계수

τ = 전단응력

H_{ac} = 아스팔트층 전체 두께

z = 표면에서부터의 깊이

$a_1 = 2.2407$

$a_2 = -2.075$

전체적으로 유사한 추세를 보이는 AASHTO 모형 을 바탕으로 수정된 깊이계수 식 (5)를 사용하고 APT실측값에 대해 회귀분석하여 한양대학교와 도로공사의 시험단면에 대한 아스팔트층의 소성변형 계수값을 표 7과 같이 보정하였다. 소성변형식의 공극률항은 표 1처럼 각 APT 단면마다 공극률의 변화가 크지 않았으나 한양대 APT 공극률 평균값 (7.381)과 도로공사 APT 공극률 평균값(8.69)를 이용하여 보정하였으며 소성변형 모형은 다음 식 (6)과 같다.

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = aN^b T^c AV^d Kz \quad (6)$$

여기서, Kz = KPRP 소성변형 모형의 깊이계수

N = 하중재하 횟수

T = 온도 (°C)

AV = 공극률 (%)

a, b, c, d = 모형계수

그림 7은 APT 각 단면에 대한 실측 소성변형량과 AASHTO 모형, 그리고 1차 보정된 소성변형 모형

표 7. 보정된 소성변형 모형의 계수값

보정계수	a	b	c	d
한양대학교 APT	5.929E-9	0.363	1.784	5.897
도로공사 APT	1.694E-8	0.363	1.784	5.897
AASHTO 모형	-3.354	0.479	1.561	None

의 예측값을 각각 비교한 것이다. 그림 7의 (a), (b)와 같이 50°C의 경우 한양대학교 A, B단면의 APT 실측 결과와 소성변형모형을 이용한 예측값이 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었으나, 그 외의 온도에 대해서는 예측값이 실측값보다 작은 값을 나타내었다. 전술한 바와 같이 도로공사 APT Pit-A단면 중 section 1과 2는 아스팔트층의 소성변형결과만을 비교하기 위해, Pit-B단면 중 section 2와 3은 표면처짐량의 측정오차가 심하여 분석이 불가하였기 때문에 각각 실측 데이터에서 제외시켰다. 반면 도로공사 APT단면의 경우는 35°C Pit A의 실측과 예측 소성 변형량의 차이가 20°C Pit B의 차이와 비교하였을 때 보다 작게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 온도의 변화에 따른 소성변형량의 실측값과 예측값의 차이는 비록 KPRP 프로그램의 소성변형모형에 이용되는 깊이계수 Kz 가 포장체내의 구속응력과 전단응력의 영향을 고려함에도 불구하고 전이계수의 부정확성과 포장층을 구성하는 각각의 혼합물에 대한 물성의 차이가 온도에 따라 다른 폭으로 변화하므로 그에 의한 영향을 받는 것으로 보인다. 따라서, 다양한 혼합물에 대한 시험결과를 이용하여 통합적인 소성변형 모델계수값을 정하는 것보다 혼합물의 종류에 따른 모델계수를 산정하는 것이 보다 정확한 결과를 예측할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후 연구과제

아스팔트 포장의 소성변형 모형에 대해 포장가속 시험의 데이터를 활용하여 보정한 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.



1. 본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 각 혼합물별로 삼축압축 반복실내시험에 의해 제안한 소성변형 모형을 포장가속시험결과와의 비교 검증을 통하여 보정하였다. 즉, 각 단면에 대한 포장가속시험결과(기층의 MDD 데이터와 횡단 프로파일의 표면 처짐값)인 실측 소성변형량과 단면으로부터 채취한 코어시편의 물성을 이용한 구조해석결과를 실내시험을 통하여 제안된 소성변형 모형에 적용하여 아스팔트 소성변형 모형의 1차 보정계수를 제안하였다.
2. 또한, 표층의 모형계수를 적용하여 전체 아스팔트층의 소성변형량을 예측한 AASHTO 모형의 결과값과 포장가속시험결과와의 보정을 통하여 포장체내의 구속응력과 전단응력의 영향을 고려한 보완된 전단응력 수정 깊이계수 K_z 를 적용한 KPRP 소성변형 모형을 제시하였다.
3. 동일한 하중과 일정한 온도에 대해 실시하는 포장가속시험의 실측 결과와 비교하였을 때, 실내시험을 통해 제안된 각 혼합물별 모형계수를 이용한 소성변형예측결과가 표층의 모형계수와 실측값에 의해 보완된 전단응력 수정 K_z 를 적용한 KPRP 소성변형 모형의 결과값보다 상대적으로 정확한 예측을 하였다. 따라서, 다양한 혼합물에 대한 시험결과를 이용하여 통합적인 소성변형 모델계수를 정하는 것보다 혼합물의 종류에 따른 모델계수를 산정하는 것이 보다 정확한 결과를 예측할 것으로 판단된다.

추후, 보조기층과 노상의 MDD 데이터와 더불어 시험도로에서 수집된 데이터를 분석하여 기층의 소성변형 모형을 보정하고, 1차 보정 완료된 모형을 도로공사 시험도로의 교통량과 환경하중, 공용기간 등의 분석 데이터와 AASHTO 2002 Design Guide 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.

참고 문헌

건설교통부 (2007) "한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 아스팔트 포장 부분 보고서

건설교통부 (2007) "한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 프로그램 부분 보고서

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

M.W. Witczak 등 (2002), Simple Performance Test for Superpave Mix Design. *NCHRP Report 465*, NCHRP.

NCHRP (2002), 2002 Design Guide : *Design of new and rehabilitated Pavement structures*, NCHRP 1-37A.

Yang H. Huang, (2004), "*Pavement Analysis and Design*" Pearson Education, Inc.

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.

접 수 일: 2008. 5. 21
 심사 일: 2008. 6. 2
 심사완료일: 2008. 8. 29