

## 아스팔트 콘크리트의 전단 물성을 고려한 영구변형 모형 개발 및 보정

### Development and Calibration of a Permanent Deformation Model for Asphalt Concrete Based on Shear Properties

이 현 종 Lee, Hyun Jong  
백 종 은 Baik, Jongeun  
리 강 Li, Qiang

정회원 · 세종대학교 건설환경공학과 교수 (E-mail: hlee@sejong.ac.kr)  
정회원 · 세종대학교 건설환경공학과 박사후과정 연구원 (E-mail: joungeunbaik@sejong.ac.kr)  
중국 난징 임업대학교 토목공학과 교수 (E-mail: lq2526@163.com)

#### ABSTRACT

This study developed a permanent deformation model for asphalt concrete based on shear properties. Repeated load triaxial compression (RLTC), triaxial compressive strength, and indirect tension strength tests were performed for the three types of asphalt mixtures at various loading and temperature conditions to correlate shear properties of asphalt mixtures to rutting performance. For the given mixtures, as testing temperature increased, cohesion decreased, but friction angle was insensitive to temperature at 40°C or higher. It was observed that deviatoric stress, confining pressure, temperature, and load frequency affected the permanent deformation of asphalt mixtures significantly. The permanent deformation model based on shear stress to strength ratio and loading time was developed using the laboratory test results and calibrated using accelerated pavement test data. The proposed model was able to predict the permanent deformation of the asphalt mixtures in a wide range of loading and temperature conditions with constant model coefficients.

#### KEYWORDS

*asphalt concrete, permanent deformation model, shear stress, shear strength, accelerated pavement test*

#### 요지

본 연구에서는 아스팔트 콘크리트의 전단 물성을 고려한 영구변형 예측 모델을 개발하였다. 아스팔트 콘크리트의 전단 물성과 영구변형과의 상관성을 고찰하기 위해서 세 가지 종류의 아스팔트 콘크리트에 대해서 반복재하삼축압축(RLTC) 시험 및 삼축압축강도 시험과 간접인장강도 시험을 다양한 하중과 온도 조건에서 시행하였다. 주어진 아스팔트 콘크리트에 대하여 온도가 증가함에 따라 점착력은 감소하였으나 온도가 40°C 이상인 경우 마찰각은 온도 변화에 민감하지 않은 거동을 나타내었다. 축차응력, 구속압, 온도 및 하중 주파수가 영구변형에 미치는 영향이 크다는 것을 관측할 수 있었다. 이러한 실내 시험 결과로부터 아스팔트 콘크리트의 전단물성과 하중재하시간에 기초한 영구변형 모델을 개발하였다. 또한 일반적인 포장 단면에서 실시한 포장가속시험 결과를 이용해서 영구변형 모델을 보정하였다. 본 연구에서 제안한 영구변형 모델을 이용하여 다양한 온도와 하중조건에서 아스팔트 콘크리트의 영구변형을 예측할 수 있었다.

#### 핵심용어

*아스팔트 콘크리트, 영구변형 모델, 전단 응력, 전단 강도, 포장가속시험*

## 1. 서론

영구변형 혹은 러팅은 아스팔트 포장에 주로 발생하는 파손형태로 반복적인 차량 하중으로 인하여 아스팔트 콘크리트 층 및 하부구조체가 구조적으로 손상되어

발생한다. 영구변형이 진행됨에 따라 운전자의 안전 및 주행성이 심각하게 저해되므로 사전에 이를 예측하여 억제할 수 있는 방법을 강구해야 한다. 이러한 아스팔트 콘크리트의 영구변형 거동을 예측하기 위해서 실내시험

및 현장시험, 포장가속시험 등을 이용한 많은 연구가 이루어졌다. 이러한 방법들 중 현장 하중 조건을 실내시험에서 유사하게 구현할 수 있는 반복재하 시험이 널리 사용되고 있다(Witczak 등, 2002). 반복재하 시험에서 가해진 하중재하 횟수와 누적 영구변형 사이의 상관성을 규명하기 위하여 다양한 회귀분석모델이 개발되었으며, 대표적으로 거듭 제곱 함수를 이용한 모델이 있다. 이러한 회귀 분석 모델에서 각 계수들은 재료의 특성, 온도 및 하중 조건에 따라서 다른 값을 가지게 된다(Biligiri 등, 2007; 이상염 등, 2008; Le 등, 2009). 또한 회귀 분석 모델 대부분은 누적 영구변형률이 직선 구간으로 나타나는 2차 변형구간에서의 특성만을 대변하기 때문에 실질적으로 급속한 변형이 발생하는 3차 변형구간(tertiary zone)에서의 거동을 정확하게 구현하지 못하는 단점이 있다(Witczak 등, 2002). 이러한 단점을 극복하기 위하여 영구변형의 각 구간을 대표하기 위해서 거듭 제곱, 선형 및 지수 함수를 사용하는 단계별 모델이 제시되었다(Zhou 등, 2004). 그러나 이러한 모델에서도 영구변형과 관련 있는 핵심적인 재료 물성을 고려하지 않았기 때문에 회귀 분석 계수가 재료의 종류에 따라서 변하게 된다. AASHTO 역학적-경험적 포장설계법에서 사용하고 있는 아스팔트 콘크리트의 영구변형 모델에서는 포장체의 변형 특성을 고려하기 위해서 회복 변형률을 사용하고 있다(ARA, 2004). 하지만 개질제를 사용한 아스팔트 콘크리트의 경우에는 아스팔트의 동탄성계수로부터 계산한 회복 변형률이 영구변형 특성을 정확하게 구현하기가 어렵다(Archilla 등, 2008). 더욱이 회복 변형률 또한 재료의 특성 및 포장체의 두께나 하중조건에 따라 변하기 때문에 아스팔트 콘크리트의 영구변형 특성을 대변하기에는 어려움이 있다. 따라서 보다 정확한 영구변형 모델을 개발하기 위해서는 영구변형과 관련 있는 재료 물성과 포장체의 거동을 대변할 수 있는 요소를 함께 고려해야 한다.

## 2. 아스팔트의 콘크리트의 전단특성을 고려한 영구변형 모델

아스팔트 콘크리트의 영구변형은 복잡한 치밀화 과정과 전단 흐름의 결과이며, 그 중에서 전단 흐름이 보다 지배적인 요소이다(Monismith 등, 1994). 따라서 아스팔트 콘크리트의 영구변형을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 아스팔트 콘크리트의 전단 특성을 고려하는 것이 바람직하다. Fwa 등(2004)은 아스팔트 콘크리트의 대표적인 전단 물성인 점착력과 마찰각을 이용한 영

구변형 모델을 개발하였다. 이 모델에서는 전단응력비, 온도 및 하중 속도가 고려되었고, 휠트래킹 시험 결과를 이용하여 모델 계수를 결정하였다. 또한 Li 등(2010)은 반복재하삼축압축(Repeated load triaxial compression, RLTC) 시험과 삼축압축강도(Triaxial compressive strength, TCS) 시험으로부터 구한 전단 응력 대 전단 강도의 비( $\tau/\tau_r$ )를 이용하여 아스팔트 혼합물의 영구변형 모델을 식 (1)과 같이 제안하였다. 이 모델의 회귀분석 계수는 재료의 종류와 하중 크기와 상관없이 적용할 수 있었고, 이 모델을 이용하여 전 변형률 구간에서 발생한 아스팔트 콘크리트의 영구변형률( $\epsilon_p$ )을 정확하게 예측할 수 있었다.

$$\epsilon_p = 6.8887 \times 10^{-4} e^{7.4733 \times 10^{-6} N} e^{6.1988 \frac{\tau}{\tau_r} N^{0.0671}} \quad (1)$$

본 연구에서는 동 저자(Li 등, 2010)에 의해서 개발된 영구변형 모델을 확장하여 다양한 하중과 온도 조건에서 영구변형을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 이를 위하여 세 가지 종류의 아스팔트 혼합물에 대해서 RLTC 시험 및 TCS 시험과 IDT 시험을 다양한 하중과 온도 조건에서 실시하였다. 이러한 실내시험결과를 바탕으로 아스팔트 콘크리트의 전단 물성과 하중재하 시간을 고려한 영구변형 모델을 개발하고, 이를 포장가속 시험 결과를 이용해서 보정하였다.

## 3. 실내 시험

### 3.1. 아스팔트 혼합물

본 연구에서는 기존 연구(Li 등, 2010)에서 사용한 것과 동일한 세 종류의 아스팔트 혼합물(AC-19C, AC-19M, SMA-13)을 대상으로 하였다. AC-19C와 AC-19M은 밀입도 아스팔트 혼합물로 최대 골재 입경이 19mm이고 각각 PG 64-22 등급의 일반 아스팔트 바인더와 PG 76-22 등급의 SBS 개질 아스팔트 바인더가 사용되었다. 두 밀입도 혼합물의 목표 공극률은  $4.0 \pm 0.5\%$ , 바인더 함량은 5.0%이다. SMA-13은 SMA(Stone Matrix Asphalt) 혼합물로, 최대 골재 입경 크기는 13mm이고, PG 64-22 등급의 일반 아스팔트 바인더가 6.5%를 사용하였다. 이때 목표 공극률은  $3.0 \pm 0.5\%$ 이다. 아스팔트 혼합물의 영구변형과 전단거동과의 관계를 분석하기 위하여 3가지 실내시험을 실시하였다. 실험에 사용된 시편은 선화다짐기를 이용하여 다짐한 후 시험 규격에 맞추어 제작하였다.

### 3.2. 시험 방법

#### 3.2.1. 반복재하삼축압축(RLTC) 시험

다양한 응력 조건에서 아스팔트 콘크리트의 영구변형 특성을 알아보기 위하여 RLTC 시험을 실시하였다. 사용한 시편의 크기는 직경과 높이의 비가 1:2인 것이 이상적이지만 선회다짐기의 한계로 인하여 지름 100mm, 높이 150mm로 하였다. 적용한 하중은 10Hz 주파수의 Haversine 형태로, 하중 간에 일정한 휴지기(하중 대 휴지기=1:9)를 두었다. RLTC 시험은  $\epsilon_p$ 가 선형으로 증가하는 구간인, 반복 하중 횟수 10,000회 때까지 시행하였다. 적용한 구속압( $\sigma_c$ )은 0, 69, 138kPa이고, 축차응력( $\sigma_a$ )은 552, 690, 828kPa이고, 온도( $T$ )는 40, 50, 60

℃이었다. 하중재하 시간의 영향을 분석하기 위하여 주행속도 32, 16, 8km/h에 해당하는 세 가지 하중재하 주파수(5.0, 2.5, 1.25Hz)에 대하여 시험을 실시하였다. 주어진 응력조건과 하중조건 및  $\epsilon_p$  값은 표 1과 같다.

#### 3.2.2. 삼축압축강도(TCS) 시험

아스팔트 콘크리트의 전단 물성을 측정하기 위해서 다양한 온도와 구속응력에서 TCS 시험을 실시하였다. 시편은 RLTC 시험과 동일하게 제작하였다. 하중재하 속도는 50mm/min이고,  $T$ 는 50℃, 60℃,  $\sigma_c$ 은 0, 69, 138kPa이었다. 시험결과로부터 Mohr-Coulomb 파괴 포락선을 결정하고 해당 조건에서 아스팔트 콘크리트의

표 1. 실내시험 조건과 결과 요약

시험 방법	온도 (°C)	시험								$\tau/\tau_f$	
		TCS		IDT/UCS		RLTC				TCS	IDT/UCS
		$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$\sigma_a$ (kPa)	$\sigma_c$ (kPa)	$t$ (s)	$\epsilon_p^*$		
AC-19C	40	-	-	587	43.9	690	69	0.1	0.008	-	0.211
	50	378	41.7	360	43.6	552	69	0.1	0.012	0.280	0.276
						690	69	0.1	0.035	0.350	0.346
						828	69	0.1	0.063	0.421	0.415
						690	0	0.1	0.056	0.409	0.411
						690	138	0.1	0.018	0.306	0.298
						690	69	0.2	0.051	0.350	0.346
						690	69	0.4	0.083	0.350	0.346
	690	69	0.8	> 0.1	0.350	0.346					
60	250	39.0	-	-	690	69	0.1	> 0.1	0.535	-	
AC-19M	40	-	-	847	43.3	690	69	0.1	0.005	-	0.153
	50	624	38.8	662	36.7	552	69	0.1	0.006	0.194	0.193
						690	69	0.1	0.011	0.242	0.242
						828	69	0.1	0.025	0.291	0.290
						690	0	0.1	0.014	0.265	0.262
						690	138	0.1	0.009	0.223	0.225
						690	69	0.2	0.012	0.242	0.242
						690	69	0.4	0.018	0.242	0.242
	690	69	0.8	0.026	0.242	0.242					
60	472	37.3	-	-	690	69	0.1	0.028	0.325	-	
SMA-13	40	-	-	521	48.2	690	69	0.1	0.013	-	0.219
	50	348	45.5	340	47.4	552	69	0.1	0.018	0.268	0.258
						690	69	0.1	0.029	0.336	0.323
						828	69	0.1	0.053	0.403	0.388
						690	0	0.1	0.057	0.405	0.396
						690	138	0.1	0.027	0.286	0.272
						690	69	0.2	0.038	0.336	0.323
						690	69	0.4	0.051	0.336	0.323
	690	69	0.8	0.077	0.336	0.323					
60	254	42.4	-	-	690	69	0.1	0.094	0.478	-	

\* 하중재하횟수가 10,000인 경우에 측정된 영구변형률

$c$ 와  $\phi$ 를 결정하였다.

### 3.2.3. 간접인장강도(IDT) 시험

Christensen과 Bonaquist(2002)는 간접인장강도( $\sigma_{IDR}$ )와 일축압축강도( $\sigma_{UCS}$ )로부터 아스팔트 콘크리트의  $c$ 와  $\phi$ 를 구하는 방법을 식 (2)와 (3)과 같이 제안하였다. 이 방법의 적용성을 확인하기 위하여 IDT 시험을 실시하였다. 사용된 시편의 직경 150mm, 높이 50mm이었다. 하중재하속도는 TCS 시험과 같은 50mm/min이고, 40°C와 50°C에서 각각 시험을 실시하여  $\sigma_{IDR}$ 를 계산하였다. TCS 시험에서 구속압이 가해지지 않을 경우( $\sigma_c=0$ ), UCS 시험과 동일한 조건이 되므로  $\sigma_{UCS}$ 는 TCS 시험 결과로부터 구하였다. IDT 시험으로부터 구한 아스팔트 콘크리트의  $c$ 와  $\phi$ 를 표 1에 나타내었다.

$$c = \left( \frac{2 - a_1}{\cos \phi} \right) \sigma_{IDR} \quad (2)$$

$$\phi = \sin^{-1}(\tan a_1) \quad (3)$$

여기서,  $a_1 = \frac{|\sigma_{UCS}| - 4|\sigma_{IDR}|}{|\sigma_{UCS}| - 2|\sigma_{IDR}|}$

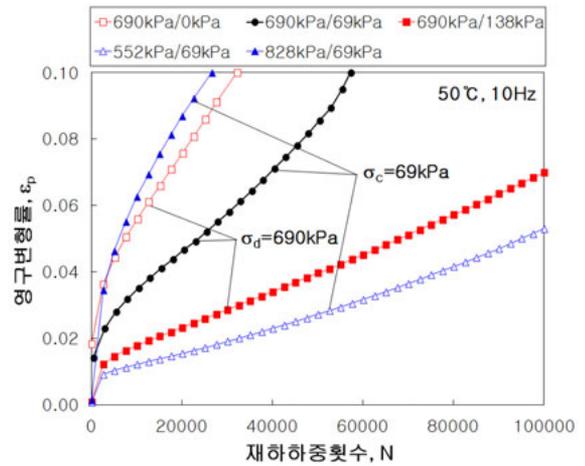
## 3.3. 시험 결과 분석

### 3.3.1. 영구변형률

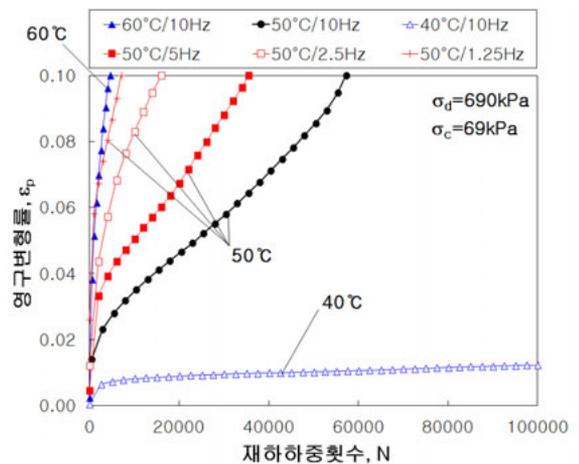
다양한 조건에서 실시한 RLTC 시험으로부터  $\sigma_d$ ,  $\sigma_c$ ,  $T$  및 하중 재하 시간( $t$ )이  $\epsilon_p$ 에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 1(a)는 AC-19C에 대하여 50°C, 10Hz의 조건에서  $N$ 에 따른  $\epsilon_p$ 의 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터  $\sigma_d$ 가 증가할수록 또는  $\sigma_c$ 가 감소할수록  $\epsilon_p$ 가 증가함을 알 수 있다. 더욱이  $\sigma_c$ 과  $\sigma_d$ 의 변화에 따른  $\epsilon_p$ 의 변화( $\Delta\epsilon_p/\Delta\sigma_c$ ,  $\Delta\epsilon_p/\Delta\sigma_d$ )가 각각  $340\text{kPa}^{-1}$ 와  $-265\text{kPa}^{-1}$ 로  $\sigma_c$ 가  $\sigma_d$ 보다 영구변형에 더 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 이는 구속압이 골재간의 상호결합력을 증가시켜 아스팔트 콘크리트의 강도를 증가시키기 때문이라고 판단된다. 따라서 아스팔트 콘크리트의 영구변형 예측 모델에는 차량 하중에 의한 수직방향의 축차응력뿐만 아니라 수평방향의 구속압도 고려해야 한다고 사료된다.

그림 1(b)는 중간 수준의 응력조건( $\sigma_d=690\text{kPa}$ ,  $\sigma_c=69\text{kPa}$ )에서 하중 주파수와 온도에 따른  $\epsilon_p$ 의 변화를 나타낸 것이다. 온도가 증가함에 따라서  $\epsilon_p$ 이 급속하게 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 온도가 증가함에 따라 바

인더의 강성이 낮아져서 혼합물의 영구변형 저항성이 떨어졌기 때문이다. 또한 하중 주파수가 감소할수록 혼합물의 강성이 완화되어 더 많은 변형이 발생하게 되었다고 사료된다. 이러한 영구변형 거동은 다른 아스팔트 혼합물(AC-19M, SMA-13)에서도 유사하게 나타났다. 따라서 보다 정확한 아스팔트 콘크리트의 영구변형 모델 개발을 위해서는 아스팔트 콘크리트의 온도에 따른 전단 물성의 변화 및 하중 재하 시간이 고려되어야 한다고 할 수 있다.



(a) 구속압과 축차응력의 영향



(b) 온도와 하중주파수의 영향

그림 1. 일반 아스팔트 혼합물(AC-19C)의 하중 재하 횟수에 따른 영구변형률의 변화

### 3.3.2. 점착력, 마찰각, 전단응력대강도비

IDT/UCS 시험과 TCS 시험으로부터 각각 결정한 전단 상수  $c$ 와  $\phi$ 를 비교하였다. 표 1에 나타낸 것과 같이 두 가지 방법으로 각각 구한  $c$ 와  $\phi$ 값의 오차가 50°C인 경우 평균 5% 이내로, 통계학적으로 차이가 없다고 할 수 있다. 제한된 조건에서 비교한 결과이나 식 (2)와 (3)을 이용하여  $c$ 와  $\phi$ 값을 구하는 방법이 타당하며, TCS

시험보다 상대적으로 간편한 IDT와 UCS 시험으로부터 아스팔트 혼합물의  $c$ 와  $\phi$  및  $\tau/\tau_f$ 를 구하는 방법이 타당하다고 사료된다. 40°C에서의  $c$ 와  $\phi$ 는 TCS시험을 실시하지 못하였기 때문에 식 (2)와 (3)을 이용하여 IDT/UCS 시험으로부터 구하고, 60°C에서는 TCS로부터 직접  $c$ 와  $\phi$ 를 구하였다. 주어진  $\sigma_c$ 와  $\sigma_d$ 에 대해서 식 (4)를 이용하여  $c$ 와  $\phi$ 로부터  $\tau/\tau_f$ 를 계산하였다.

$$\frac{\tau}{\tau_f} = \frac{\sigma_d(\tan \phi \sin \phi + \cos \phi - \tan \phi)}{2(c + \sigma_c \tan \phi)} \quad (4)$$

표 1에서 나타난 바와 같이 개질제가 사용된 AC-19M의 경우 일반 아스팔트를 사용한 AC-19C와 SMA-13보다 상대적으로 높은 점착력을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 아스팔트 콘크리트의 점착력이 골재보다는 바인더 물성의 영향에 더 많이 받음을 알 수 있다. 반면에 마찰각은 SMA-13에서 가장 크게 나타나므로 마찰각은 사용된 골재의 영향을 좀 더 많이 받는다고 사료된다.

아스팔트 콘크리트의 온도가 전단 물성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 40, 50, 60°C에서의  $c$ ,  $\phi$ ,  $\tau/\tau_f$ 값을 비교하였다. 온도가 증가함에 따라서 점착력이 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 반면에 온도가 40°C 이상인 경우, 마찰각은 온도에 따라 다소 감소하나 감소 폭은 상대적으로 적게 나타났다. 전단강도는 온도가 증가함에 따라 낮아지기 때문에  $\tau/\tau_f$ 는 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 일반 바인더가 사용된 AC-19C와 SMA-13의 경우  $\tau/\tau_f$ 가 보다 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향으로부터 본 연구에서 사용한 아스팔트 콘크리트의 경우 골재의 입도 분포보다는 바인더의 물성이 영구변형에 미치는 영향이 더 크다고 판단된다.

## 4. 영구변형 모델 개발 및 보정

### 4.1. 영구변형 모델

본 연구에서는 영구변형 모델을 개발하기 위하여 기존 연구(Li 등 2010)에서 사용한 실내 시험 결과도 포함하였다. 기존 연구에서도 본 연구와 동일한 세 종류의 아스팔트 콘크리트를 사용하였으며, 바인더 함량은 5단계로 변화시켜 바인더의 함량이 영구변형에 미치는 영향을 고려하였으나, 반면에 온도와 하중은 한 가지 조건에서 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 이를 확장하여 다양한 온도와 하중 조건을 고려하였다. 그림 2는 RLTC 시험에서 10,000번 하중 재하 시 측정된  $\epsilon_p$ 과  $\tau/\tau_f$ 의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바

와 같이  $\tau/\tau_f$ 가 증가함에 따라서 아스팔트 콘크리트의 종류, 온도, 하중조건과 상관없이  $\epsilon_p$ 가 유사한 경향으로 증가함을 알 수 있었다. 이를 지수함수를 이용하여 회귀 분석을 한 경우, 상관계수( $R^2$ )가 0.94로,  $\epsilon_p$ 와  $\tau/\tau_f$  사이의 상관성이 매우 높다고 할 수 있다. 여기서  $\tau/\tau_f$ 가 유사한 경우, 아스팔트 콘크리트에 가해진 하중과 온도 조건이 상이함에서도 불구하고  $\epsilon_p$ 이 유사하게 나타났다. 따라서  $\tau/\tau_f$ 가 아스팔트 콘크리트의 종류뿐만 아니라 하중 및 온도와 상관없이 아스팔트 콘크리트의 영구변형 특성을 대변할 수 있는 합리적인 지표로 사용될 수 있다고 판단된다.

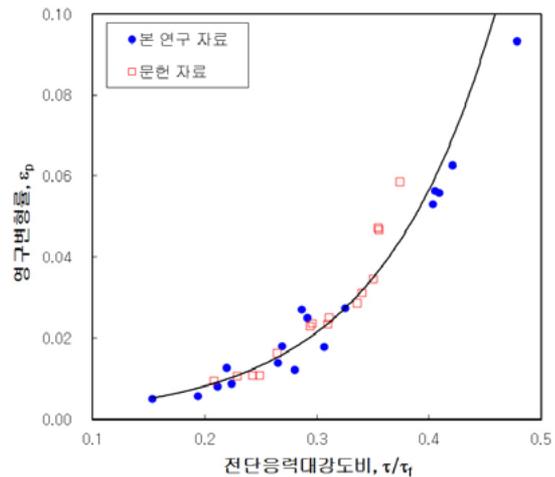


그림 2. 영구변형률과 전단응력대강도비의 상관관계

아스팔트 콘크리트의 전단 물성  $c$ 와  $\phi$ 는 TCS나 IDT/UCS와 같은 실내시험을 통해서 직접 측정할 수도 있고, 다음과 같은 회귀분석 식을 이용하여 아스팔트 콘크리트의 특성으로부터 추정할 수 있다(Li 등 2010).

$$c = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 V_b + \alpha_3 A_v \quad (5)$$

$$\phi = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 V_b + \beta_3 A_v \quad (6)$$

여기서,  $c$ 는 점착력(kPa),  $\phi$ 는 마찰각( $^\circ$ ),  $T$ 는 온도( $^\circ\text{C}$ ),  $V_b$ 는 바인더 함량(%),  $A_v$ 는 공극률(%), 그리고  $\alpha_i$ 와  $\beta_i$ 는 점착력과 마찰각에 대한 회귀분석 계수로 표 2에 나타내었다.

표 2. 각 혼합물별 점착력과 마찰각 계산에 사용되는 회귀 분석 계수

혼합물	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$R^2$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R^2$
AC-19C	1694.2	-16.0	-85.0	-26.6	0.985	54.2	-0.4	0.9	1.1	0.946
AC-19M	2299.1	-17.5	-129.1	-42.9	0.979	63.0	-0.5	-0.6	1.2	0.845
SMA-13	2379.3	-13.4	-179.0	-62.8	0.971	45.4	-0.3	1.7	1.3	0.991

위와 같은 방법으로 아스팔트 콘크리트의  $c$ 와  $\phi$ 값을 구한 후,  $\tau/\tau_f$ 는 아스팔트 콘크리트에 발생하는 응력 조건( $\sigma_c, \sigma_d$ )을 고려하여 식 (4)를 이용하여 계산한다. 그리고 주어진 하중 재하 시간을 적용하여  $\epsilon_p$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\epsilon_p = 2.9895 \times 10^{-3} e^{6.2807 \times 10^{-6} N} e^{3.6723 \frac{\tau}{\tau_f} N^{0.1032}} t^{0.4224} \quad (7)$$

여기서,  $t$ 는 하중 재하 시간(초)이고  $N$ 은 하중 재하 횟수이다.

본 연구에서 제안된 영구변형 모델에서는 기존 모델에서는 고려하지 않았던 하중 재하 시간을 입력 변수로 사용하여 차량 속도가 영구변형에 미치는 영향을 고려하였다. 반면 온도의 영향은 아스팔트 콘크리트의  $c$ 와  $\phi$ 의 계산에 이미 반영되었으므로, 영구변형 모델에 온도를 입력변수로 직접 포함시키지 않았다. 아스팔트 콘크리트의  $\tau/\tau_f$ 로부터 예측한 영구변형률과 RLTC 시험에서 측정된 값을 비교하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)의 경우 아스팔트 콘크리트의 전단 상수를 시험으로부터 측정된 값을 사용하였고, 그림 3(b)에서는 식 (5)와 (6)을 사용하여 예측한 값을 사용하였다. 315개의 측정값과 비교하여 계산한 오차는 각각 13.3%와 14.3%로, 본 연구에서 제시한 영구변형 모델을 이용하여 예측한 영구변형률 값이 측정된 값과 잘 맞다고 할 수 있다.

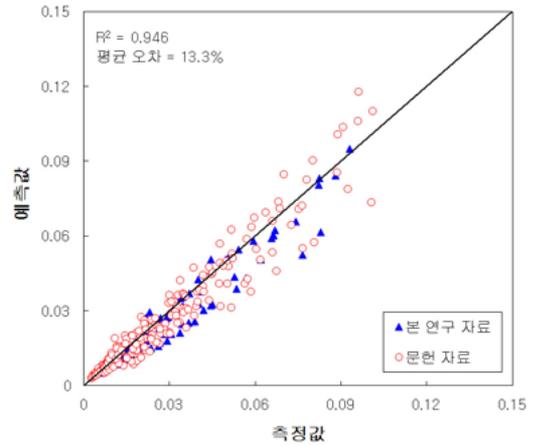
## 4.2. 포장가속시험을 통한 영구변형 모델 보정

### 4.2.1. 포장가속시험

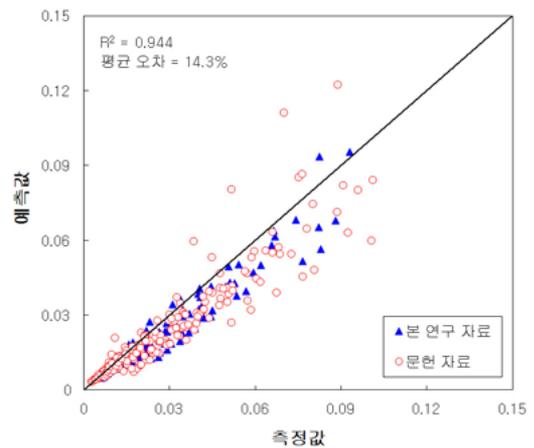
실내시험으로부터 개발한 영구변형 모델을 포장가속 시험 결과(Le 등, 2009)를 이용하여 보정하였다. 그림 4는 포장가속시험에 적용된 포장 단면과 시험 조건을 나타낸다. 두 구간 모두 국내에서 일반적으로 많이 사용되는 포장 단면으로 구성되어있고, 표층과 중간층의 공극률을 제외한 나머지 물성과 두께는 동일하다. 이때 아스팔트 표층(AC-19C)과 중간층(AC-25)의 최대골재크기는 19mm와 25mm이고, PG 64-22 등급의 아스팔트 바인더가 5.0%와 4.5% 사용되었다. 표층과 중간층의 평균 공극률은 7.5%와 7.3%이다.

포장가속시험은 세 가지 온도(35, 40, 50°C)에서 실시하였다. 축하중 9톤, 접지압 641.6kPa의 하중을 12m의 직선 구간에서 10km/h의 속도로 왕복운동 시켰다. 이때 발생하는 포장체 내부의 처짐을 측정하기 위하여 깊이별 처짐 측정기(Multi-Depth Deflectometers, MDD)를

아스팔트 기층 상부와 보조기층 및 노상 중간에 설치하였다. 또한 레이저 프로파일러를 이용하여 표면 처짐을 측정하였다. 표층과 중간층에서 발생하는 영구변형량은 기층 상단에 설치한 MDD에서 측정된 처짐과 포장체 표면 처짐의 차이로부터 추정된 것이다.



(a) 측정된  $c, \phi$  값



(b) 예측한  $c, \phi$  값

그림 3. 영구변형 모델 예측값과 실측값 비교

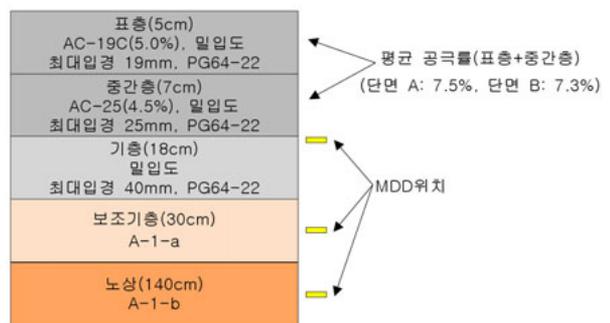


그림 4. 포장가속시험에서 사용된 포장구조체 단면 및 재료 물성(Le 등, 2009)

#### 4.2.2. 유한요소해석

포장가속시험에서 아스팔트 콘크리트 층에 발생하는 전단응력을 구하기 위하여 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 포장가속시험을 모사하였다. 유한요소모델은 총 4,736개의 3차원 Solid 요소를 사용하여 포장가속시험에 사용된 포장구조체와 동일한 단면을 구성하였다. 이때 노상의 두께는 하부 경계조건이 해석에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 6m로 설정하였다(백종은 등, 2001). 듀얼 타이어 한 개의 접지면적 너비와 길이는 각각 31.5cm와 22.0cm이며, 접지압은 포장가속시험과 동일한 641.6kPa을 사용하였다. 위와 같이 구성된 유한요소모델은 듀얼 타이어의 중심을 기준으로 상하 및 좌우대칭 거동을 하기 때문에 이를 경계조건에 반영하여 전체 해석 단면의 1/4에 해당하는 부분만 모델에 적용하였다.

각 층에 사용되는 재료의 물성은 기존의 연구(Le 등, 2009)에서 사용한 값을 사용하였다. 아스팔트 콘크리트의 탄성계수는 시험구간에서 추출한 코어 샘플을 이용하여 측정된 동탄성계수 마스터곡선으로부터 포장가속시험에서 측정된 포장체 깊이별 온도 및 하중재하시간에 해당하는 값을 사용하였다. 표 3은 유한요소해석에 사용한 아스팔트 콘크리트 층의 온도별 탄성계수를 나타낸다. 보조기층과 노상의 탄성계수는 각각 92MPa와 120MPa를 사용하였다. 또한 아스팔트 콘크리트, 보조기층, 노상의 포아송비는 각각 0.35, 0.35, 0.40이었다.

표 3. 유한요소해석에 사용된 아스팔트 콘크리트 층의 온도 및 탄성계수

층	층두께 (cm)	대표온도 35°C		대표온도 40°C		대표온도 50°C	
		E(MPa)	온도(°C)	E(MPa)	온도(°C)	E(MPa)	온도(°C)
표층	5	3304	35.0	2048	40.5	933	50.2
중간층	7	3265	33.8	1988	39.5	1000	47.9
기층	6	3561	32.0	2025	38.6	1082	46.1
	6	3988	30.0	2085	37.6	1148	44.7
	6	4160	29.0	2178	36.6	1196	43.7

본 해석에 사용된 아스팔트 콘크리트의 전단강도를 계산하기 위하여 우선  $c$ 와  $\phi$ 값을 다음과 같이 구하였다. 아스팔트 표층(AC-19C)의 경우 식 (5)와 (6)를 이용하여  $c$ 와  $\phi$ 값을 추정하였다. 아스팔트 중간층의 경우 식 (5)와 (6)을 적용할 수 없으므로 추가로 실내 시험을 실시하여  $c$ 와  $\phi$ 값을 측정하였다. 아스팔트 기층의 경우 골재 크기가 최대 40mm로 실내시험을 실시할 수가 없었기 때문에 아스팔트 중간층과 동일한 물성을 사용하였다. 이렇게 얻어진 각 아스팔트 콘크리트 층의

$c$ 와  $\phi$ 값을 표 4에 나타내었다.

표 4. 포장가속시험 구간에 사용된 아스팔트 콘크리트의 전단 물성

혼합물	온도 (°C)	단면 A		단면 B	
		$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)
표층 (AC-19C)	35	512	53.4	516	53.2
	40	432	51.4	436	51.3
	50	272	47.5	276	47.4
중간층 (AC-25)	35	698	49.3	698	49.3
	40	558	47.0	558	47.0
	50	374	45.1	374	45.1

포장체내에서 발생하는  $\tau$ ,  $\tau_f$ ,  $\tau/\tau_f$ 를 포장체의 온도 및 깊이와 하중재하위치에 따라서 분석하였다. 그림 5는 35°C와 50°C에서 듀얼 타이어 외측 모서리 아래 깊이 2.5cm(표층 중간)와 8.5cm(중간층 중간)에서의  $\tau$ ,  $\tau_f$ ,  $\tau/\tau_f$ 값을 비교한 것이다. 온도가 증가함에 따라 동일한 지점에서  $\tau$ 은 평균 16% 증가하였으나,  $\tau/\tau_f$ 는 평균 105% 증가하였다. 이와 같은 차이는 표 4에 나타난 바와 같이 50°C에서의 아스팔트 콘크리트의 전단 물성이 35°C의 경우 보다 작기 때문에,  $\tau_f$ 가 평균 43% 감소하였기 때문이다. 또한 깊이가 깊어짐에 따라서  $\tau$ 은 증가하고,  $\tau_f$ 는 감소하여  $\tau/\tau_f$ 는 증가하는 경향을 나타내었다.

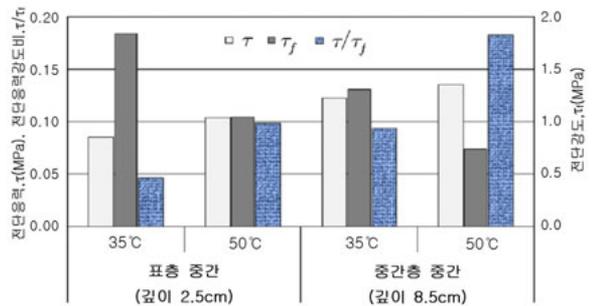


그림 5. 온도와 깊이에 따른 전단응력, 전단강도, 전단응력 강도비의 변화(단면A, 타이어 외측 모서리)

그림 6은 단면 A에서 50°C에서 포장체 표면으로부터의 깊이와 하중재하 위치에 따른  $\tau/\tau_f$ 의 변화를 나타낸 것이다. 아스팔트 표층에서는 듀얼 타이어 중심(A지점)에서  $\tau/\tau_f$ 가 가장 크게 나타난다. 이는 A지점에서는 최소 주응력( $\sigma_3$ )이 0에 가깝거나 인장상태로 나타나므로 이에 따라  $\tau_f$ 가 상대적으로 작기 때문에 표층에서  $\tau$ 이 크지 않음에도 불구하고  $\tau/\tau_f$ 가 상대적으로 크게 나타났다. 하중 재하 중심위치(B지점)에서는 높은 구속압으로 인하여  $\tau_f$ 가 크게 되므로,  $\tau/\tau_f$ 가 상대적으로 작게

된다. 타이어 외측 경계부(D지점)에서의 경우 깊이와 상관없이 다른 위치에 비해서 상대적으로  $\tau/\tau_f$ 가 크게 나타났다. 이는 표층에서는 낮은 구속압으로 인하여  $\tau_f$ 가 작기 때문이고, 중간층에서는 깊이가 증가함에 따라서는  $\tau$ 이 상대적으로 크기 때문이다. 이와 같은 결과로부터 차량하중에 의하여 발생한  $\tau$ 뿐만이 아니라 아스팔트 콘크리트의  $\tau_f$ 가  $\tau/\tau_f$ 에 미치는 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

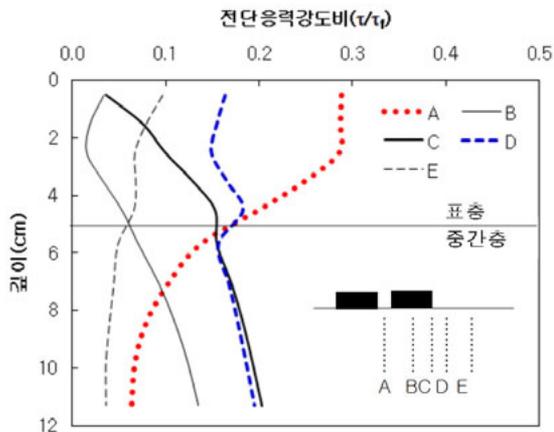


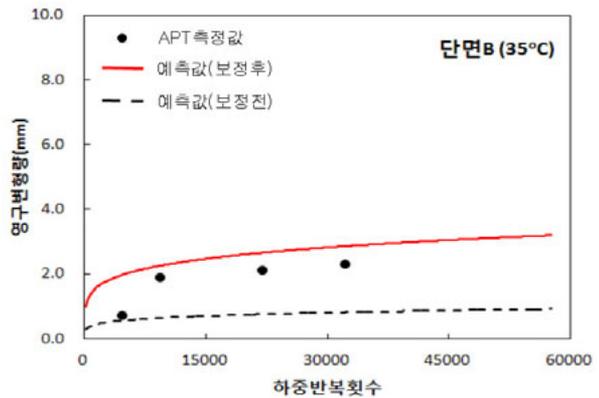
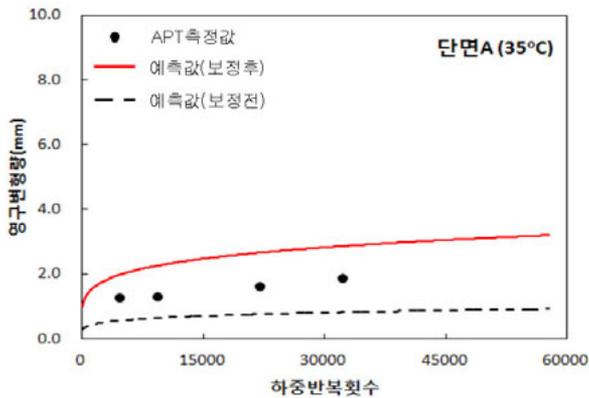
그림 6. 포장체 깊이와 하중재하 위치에 따른 전단응력강도비(τ/τ<sub>f</sub>)의 변화(단면 A, 50°C)

#### 4.2.4. 영구변형을 모델 보정

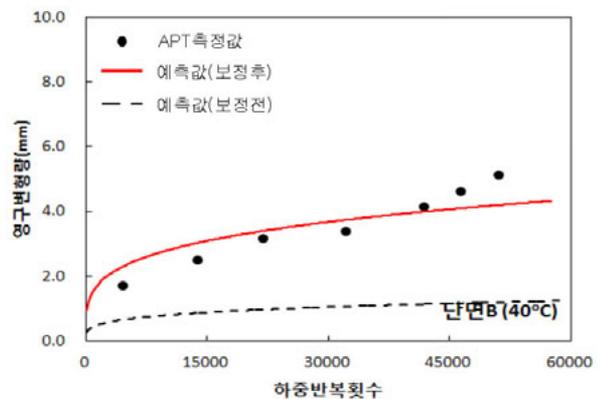
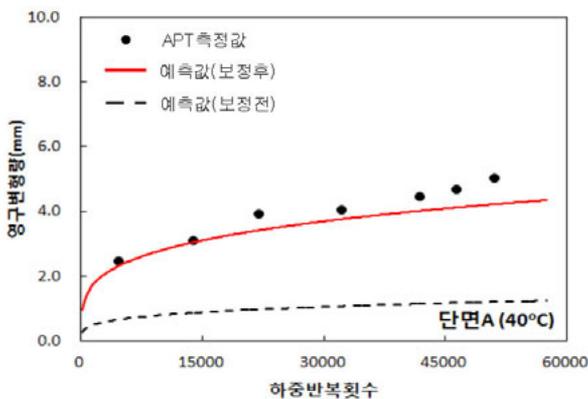
포장가속시험에서 영구변형은 타이어의 외측 모서리에서 최대로 발생하는 것이 관측되었으므로 유한요소해석에서도 동일한 지점에서의  $\tau$ 와  $\tau_f$ 를 계산하여 영구변형량을 예측하였다. 유한요소모델에서 각 요소에서 발생하는  $\tau/\tau_f$ 와  $t$ (하중재하시간)를 식(7)에 적용하여  $\epsilon_p$ 을 계산하였다. 이 값에 해당 요소의 두께를 곱하여 층별 영구변형량을 계산하고, 이를 합산하여 전체 아스팔트 콘크리트 층에서의 영구변형량을 계산하였다. 이때 현장 실측값이 예측값보다 평균 3.5배 크게 나타났으므로, 이를 식 (7)에 적용하여 차이를 보정하였다. 이러한 차이가 발생하는 원인은 아스팔트 콘크리트의 노후화, 다짐 방법, 하중 조건, 측정 방법 등 현장과 실내 시험 조건의 차이라고 사료된다. 이러한 보정과정을 통하여 수정된 최종 영구변형 모델은 다음과 같다.

$$\epsilon_p = 1.046 \times 10^{-2} e^{6.2807 \times 10^{-6} N} e^{3.6723 \frac{\tau}{\tau_f} N^{0.1032}} t^{0.4224} \quad (8)$$

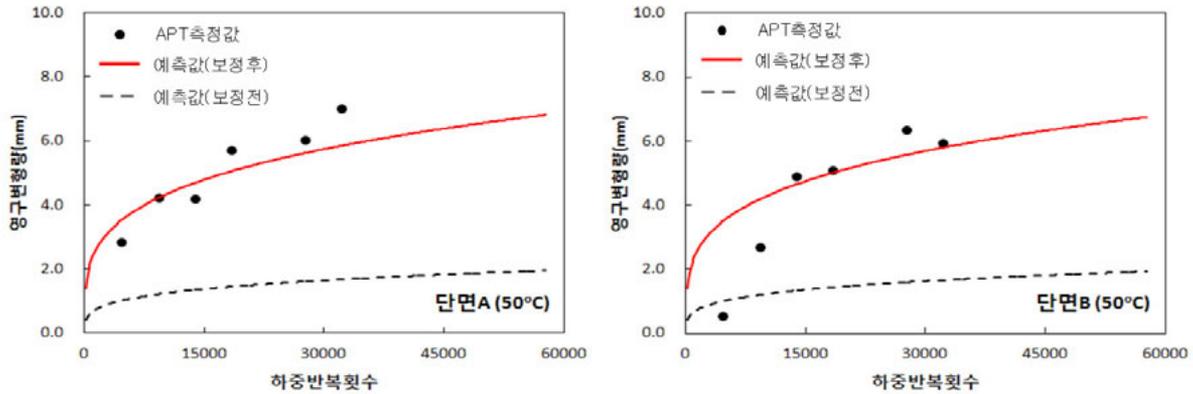
그림 7은 본 연구에서 제안한 영구변형 모델로부터 계산한 영구변형량과 현장 측정값을 비교한 것이다. 그



(a) 35°C



(b) 40°C



(c) 50°C

그림 7. 보정된 영구변형 예측모델 및 포장가속시험에서 구한 영구변형량 비교

림에서 나타난 바와 같이 주어진 조건에서 본 연구에서 제안한 영구변형 모델로부터 계산한 값이 현장 계측값과 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만, 보다 다양한 조건에서의 영구변형량을 정확히 예측하기 위해서는 다양한 온도와 재료에 대한 검증 및 보정이 필요하다고 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 아스팔트 콘크리트의 전단 물성에 기초한 영구변형 모델을 개발하였고 포장가속시험 결과를 이용하여 이를 보정하였다. 선행연구에서 개발했던 기존 영구변형 모델에서 온도 및 하중재하시간을 고려할 수 있도록 개선하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 아스팔트 콘크리트의 영구변형에 영향을 미치는 주요 인자로는 축차 응력, 구속압, 온도 및 하중 주파수 등의 하중 및 환경 요소들이다. 따라서 이러한 요소들을 영구변형 모델에서 반드시 고려하여야 한다.
2. 주어진 아스팔트 콘크리트에 대하여 점착력은 온도에 따라서 감소하였고, 반면에 40°C 이상인 경우 마찰각의 변화는 상대적으로 크지 않았다.
3. 본 연구에서 제안된 영구변형 모델은 아스팔트 콘크리트의 영구변형 특성을 근본적으로 나타낼 수 있는 전단 특성을 고려하였기 때문에, 다른 종류의 아스팔트 콘크리트에 대하여 모델 계수는 변하지 않고 다양한 온도 및 하중 조건에서 영구변형률을 성공적으로 예측할 수 있었다.
4. 본 연구에서 제안한 점착력과 마찰각 모델은 제한된

시험 조건과 재료에 대하여 회귀분석을 통하여 개발 되었으므로 추후에 좀 더 다양한 조건과 재료에 대한 시험을 통하여 검증되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년도 세종대학교 교내연구비 지원에 의한 논문이며 이에 세종대학교 및 관계자 여러분에게 감사의 말씀을 전합니다.

## 참고 문헌

- 백종은, 최준성, 김수일 (2001) "FWD 시험의 수치해석모델을 이용한 아스팔트 포장구조체의 기반암 깊이 추정", *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제21권, 5D, pp. 643-654.
- 이상영, 이현중, 허재원, 박희문 (2008) "실내 및 포장가속시험을 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형 모형 개발", *한국도로학회논문집*, 한국도로학회, 제10권, 제4호, pp. 79-89.
- Applied Research Associate (2004) "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", *National Cooperative Highway Research Program, Final Report*, Champaign, IL.
- Archilla, A. R., de Lannoy Kobayashi, L., and Diaz, L. G. (2008) "Using Permanent Deformation Tests and the MEPDG to Quantify Permanent Deformation Improvements from Modified Binders", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 77, pp. 1005-1035.
- Biligiri, K. P., Kaloush, K. E., Mamlouk, M. S., and Witczak, M. W. (2007) "Rational Modeling of Tertiary Flow for Asphalt Mixtures", *Transportation Research Record, TRB of the National Academies*, No. 2001, pp. 63-72.

- Christensen, D. W., and Bonaquist, R. (2002) "Use of Strength Tests for Evaluating the Rut Resistance of Asphalt Concrete", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 71, pp. 692-711.
- Fwa, T. F., Tan, S. A., and Zhu, L. Y. (2004) "Rutting Prediction of Asphalt Pavement Layer Using c-f Model", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 5, pp. 675-683.
- Le, A. T., Lee, H. J., Park, H. M., and Lee, S. Y. (2009) "Development of a Permanent Deformation Model of Asphalt Mixtures for South Korean Pavement Design Guide", *Transportation Research Record, TRB of the National Academies*, No. 2095, pp. 45-52.
- Li, Q., Lee, H. J., and Hwang, E. Y. (2010) "Characterization of Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Based on Shear Properties", *Transportation Research Record, TRB of the National Academies*, No. 2181, pp. 1-10.
- Monismith, C. L., Hicks, R. G., Finn, F. N., Sousa, J., Harvey, J., Weissman, S., Deacon, J., Coplantz, J., and Paulsen, G. (1994) "Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes", *Report No. SHRP-A-415, SHRP*, National Research Council, Washington, D.C.
- Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., and El-Basyouny, M. (2002) "Simple Performance Test for Superpave Mix Design", *National Cooperative Highway Research Program, Report 465*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Zhou, F., Scullion, T., and Sun, L. (2004). "Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 4, pp. 486-494.

접 수 일 : 2011. 8. 16

심 사 일 : 2011. 8. 24

심사완료일 : 2011. 10. 18