



아스팔트 혼합물의 용적 특성을 이용한 소성변형 추정 연구

Estimation of Rutting based on Volumetric Properties of Asphalt Mixture

이 상 범* 도 영 수** 김 광 우***
Li, Xiang Fan Doh, Young Soo Kim, Kwang Woo

Abstract

Rutting on asphalt pavement surface is an important damage in most roadways in the world. Most of researches have developed prediction model for rutting on asphalt pavement as a function of physical properties of asphalt binder. But this study was devised to estimate rutting based on fundamental properties of asphalt mixture, not binder. Therefore this study objective is to estimate rutting based on volumetric properties, that is Air void, Void in mineral aggregate(VMA) and Void filled with asphalt(VFA), of asphalt mixture with various asphalt binders, aggregates and aggregate gradation. Results showed that it was possible to estimate rutting depth based on volumetric variables of asphalt mixture. In addition, VMA, the variable which is not used in mix design in Korea, showed a significant correlation with rutting. It is recommended that VMA is adapted as a variable in domestic mix design. Also, It showed that VFA in the specification should be lowered at least 5% point since VFA was somewhat higher than optimum.

Keywords : rutting, prediction model, VMA, VFA, Air void, asphalt binder, aggregate gradation

요 지

본 논문은 아스팔트 포장의 주요 파손 형태의 하나인 소성변형을 예측하기 위한 연구로서 빠르고 손쉽게 구할 수 있는 혼합물의 공극 관련된 물리적 특성인 공극률, 골재간극률, 포화도 등에 근거하여 소성변형과의 상관성을 추정하고자 하였다. 이를 위하여 두 종류의 골재, 밀입도, 갭입도, 일반아스팔트, 개질아스팔트 등을 조합한 혼합물에 대하여 반복주행시험을 수행하였다. 그 결과 혼합물의 공극관련변수로 소성변형 깊이의 추정이 가능함을 확인하였다. 또한 국내에서 사용하지

* 정회원 · SK Corp. SK China Asphalt Technology Institute · Ph. D

** 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 책임연구원 · 공학박사

*** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사



않고 있는 물성이 골재간극률이 소성변형에 크게 영향을 미치는 인자로 확인되어 향후 국내 배합 설계규정에 이 규정을 추가하는 것을 고려해야 할 것으로 사료되었으며, 포화도는 국내의 규정이 너무 높아 하향조정이 필요한 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 소성변형, 밀입도, 갭입도, 개질아스팔트, 반복주행시험, 골재간극률, 포화도

1. 서론

국내의 가열 아스팔트 포장에 각종 균열 및 소성변형 등의 파손으로 설계수명을 다하지 못하고 조기 파손되는 경우가 많다. 최근 연구보고(소성변형... 2002)에 따르면 2002년 국도 아스팔트 포장에 대한 현장조사자료를 근거로 분석한 파손형태별 분포는 균열 등의 파손이 전체 도로의 약 50%인 반면에 소성변형은 대략 91% 정도로 가장 심각한 상태에 있음을 알 수 있다. 이로 인한 건설교통부 도로유지 보수비용 중 아스팔트 포장의 소성변형을 처리하기 위한 보수비용이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 1997년도 건교부 집계자료에 의하면 도로포장 유지보수 비용에 사용된 예산은 1987년에는 약 300억, 1996년에는 약 700억, 2002년에는 1조 7,000억원(국비:1조 250억, 지방비:6,770억)으로 매년 꾸준히 증가하고 있는 실정이다.

이러한 소성변형을 제어하기 위해 일본의 경우 반복주행시험, 미국과 유럽에서는 정·동적 크리프시험을 통하여 소성변형을 최소화하기 위한 연구를 수행하고 있다. 최근 국내에서는 소성변형 제어를 위하여 미국의 Superpave 배합설계에 관심을 보이고 있다. 하지만 이러한 시험방법은 시험장비가 고가이고 실험시간이 비교적 오래 걸리는 단점이 있다. 또한 현재 국내 실정을 살펴보면, 이러한 시험은 극히 일부 대학 및 연구기관에서 연구용으로만 수행되고 있다.

따라서 본 연구는 이러한 국내 실정을 감안하여 짧은 시간 내에 쉽고 빠르게 구할 수 있는 혼합물의 물리적 특성인 골재 간극률(void in mineral aggregate: VMA), 포화도(void filled with

asphalt cement: VFA), 공극률(air void) 등에 근거하여 소성변형과의 상관성을 추정하고자 한다. 이 사용된 변수의 선정 이유는 다음과 같다. 국내 배합 설계에서는 VMA가 혼합물의 특성에 큰 영향을 미침에도 불구하고 이에 대한 규정값이 제시되어 있지 않고 VFA도 외국의 배합설계에 비해 10% 정도 높게 규정되어 있으며 배합설계의 기준이 되는 공극률 4%를 중심으로 그 변화가 소성변형과 어떤 관계를 나타내는지 체계적으로 파악하기 위함이다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에서 아스팔트는 국내에서 생산되는 AC 80-100, AC 60-80 (AP3, AP5)를 사용하였다.

골재는 전국적으로 분포가 많고 성능이 좋은 편마암(Gneiss)과 화강암(Granite)을 선정하였다. 골재는 소성변형에 영향을 미치는 주요 인자이므로 본 연구에서는 골재의 종류, 입도를 변화시켜 굵은골재 최대치수를 밀입도는 19mm, 갭입도 혼합물은 13mm로 사용하였다. 밀입도 혼합물의 입도는 건설교통부 19mm 밀입도 규격에 적합한 입도를 선정하였으며, 갭입도는 본 강원대학교 연구실에서 개발한 입도를 사용하였으며(김광우 등 1998), 골재들의 입도분포 곡선은 그림 1에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 폴리머는 수년간의 연구(김광우 등 1997)로부터 국내에서 생산된 여러 종류의 폴리머 가운데 아스팔트 개질제로서 그 성능이 우수한 것으로 판명되고 외국에서도 많이 사용되는 LDPE

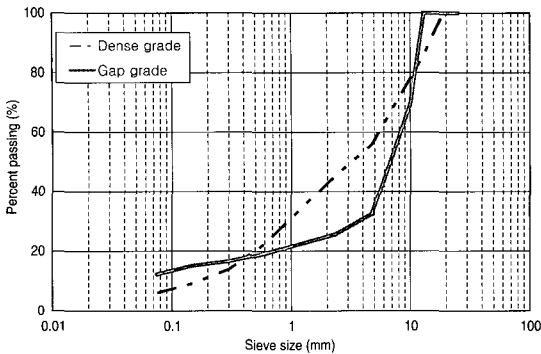


그림 1. Gradation curves of aggregates

(Low-density polyethylene)와 SBS(Styrene-butadiene-styrene) 두 가지를 사용하였다.

갭입도 아스팔트 혼합물은 고온에서 아스팔트의 침강현상이 발생하는 것을 제어하기 위하여 기존 연구결과에 따라 섬유재로 폐신문지를 2×2mm로 잘게 절단하여 아스팔트 양의 3%를 첨가하여 혼합물을 제조하였다(김광우 등 1998).

2.2 시험방법

본 연구에서는 두 폴리머 재료 (LDPE, SBS)를 아스팔트 양의 중량비로 각각 LDPE는 4%, 6%, SBS는 3%, 5% 비율로 AP3 아스팔트에 혼합하여 개질 아스팔트를 제조하였다. 이 비율은 문헌조사와 연구의 결과를 통하여 가장 적절한 것으로 판명되어 많이 이용된다(김광우 등 2000).

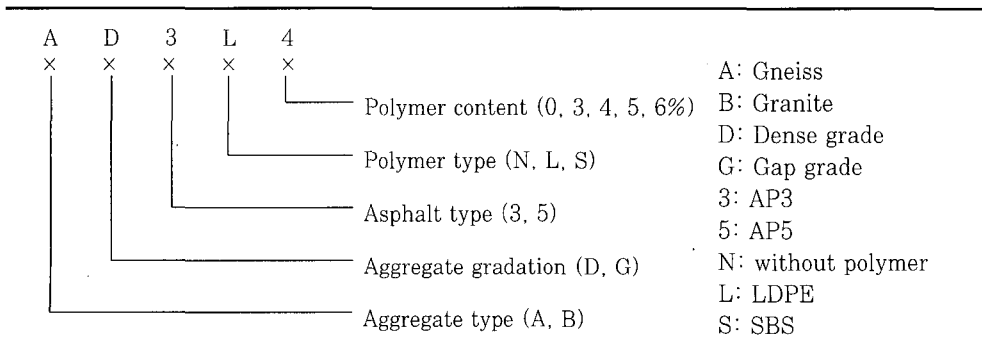
본 연구에서는 아스팔트(AP3, AP5) 두 종류, 골재(편마암, 화강암) 두 종류, 폴리머 (LDPE, SBS) 두 종류를 두 가지 첨가함량으로 결정하고 배합설계를 수행하여 표 1과 같이 명명하였다. 배합설계를 통하여 결정된 각각의 최적아스팔트 함량은 본 시험의 공시체 제작의 아스팔트 함량으로 이용되었다.

선정된 최적 골재를 가지고 일반 아스팔트와 섬유재의 첨가에 따른 혼합물의 배합설계는 아스팔트 양을 골재 총 중량의 5%를 기준으로 $\pm 0.5\%$ 와 $\pm 1.0\%$ 로 실시하였으며 또한 폴리머 개질 아스팔트와 섬유재를 모두 사용한 아스팔트 배합설계도 위와 같은 방법으로 하여 최적아스팔트함량(optimum asphalt content: OAC)을 결정하였다.

공시체는 KSF 2337과 ASTM D 1559의 마샬식 아스팔트 혼합물 제조 방법에 따라 제조하였다. 먼저 준비된 골재를 오븐에 넣어 $180 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 최소 5시간 이상 충분히 가열하였다. 그리고 약 $180 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 온도에서 60~80분간 가열된 아스팔트를 넣은 다음 소정의 온도에서 혼합하여 몰드에 넣고 다짐온도 (일반 아스팔트 혼합물: $135 \sim 145^\circ\text{C}$, 폴리머 개질 아스팔트 혼합물: $145 \sim 155^\circ\text{C}$)를 유지하면서 마샬다짐기를 이용하여 공시체의 양면을 각각 50회씩 다짐하였다.

아스팔트 콘크리트의 소성변형 발생 메커니즘을 모사한 시험방법이 반복주행 시험이다. 본 연구에서는 배합설계를 거쳐 결정된 최적아스팔트함량으로

표 1. Mixture designation





305×305×70mm의 슬래브 공시체를 공극률 8, 6, 4, 2%의 목표로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 실험실에서 양생 후 반으로 잘라 시험온도 60℃에서 6시간 이상 보관 후 반복주행 시험기로 시험을 수행하였다.

반복주행 시험기는 강재(鋼材) 바퀴를 사용하였고 지름은 200mm, 바퀴의 너비는 52mm로 하였으며 바퀴의 반복주행에 따른 수직 침하량을 측정하였다. 또한 강재와 아스팔트 콘크리트의 직접 접촉에 의한 골재의 파손 등을 방지하기 위하여 폴리프로필렌 부직포를 공시체 표면에 덮었다. 차륜 축하중은 70kgf, 1차 주행거리는 200mm로 하고 축에 LVDT를 설치하여 반복주행에 따른 수직침하량(mm)을 컴퓨터를 통해 측정·기록하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배합설계

선정된 골재를 이용하여 일반아스팔트 혼합물, 폴리머 개질 아스팔트 혼합물에 대한 배합설계를 수행하여 각 혼합물의 최적아스팔트 함량(OAC)을 결정하였다.

OAC를 결정함에 있어 국내의 포화도 (VFA) 규정은 75~85%를 사용하는데, 이는 미국 아스팔트연구원 (Asphalt Institute: AI)의 MS-2 규정인 65~75%보다 10% 정도가 높은 것이다. 각 배합설계의 아스팔트 함량은 거의 포화도와 공극률에 지배를 받았다. 즉, 대부분의 경우 국내 규정 포화도의 하한선과 공극률의 상한선 사이에서 대부분 OAC의 허용 범위가 형성되었다.

VFA는 VMA 부분을 아스팔트가 얼마나 채우고 있는지를 나타내는 지수로서 이것이 높으면 아스팔트가 많이 들어간 상태이므로 혼합물의 유동성이 커져 소성변형에 취약해질 가능성이 높다는 것을 의미한다. 따라서 각 혼합물 별로 최적아스팔트 함량을

표 2. Marshall properties of each mixtures at OAC

Mixture types	OAC (%)	Mixture types	OAC (%)
AD5N0	5.1	BD5N0	5.0
AD3L4	5.2	BD3L4	5.3
AD3L6	5.2	BD3L6	5.2
AD3S3	5.3	BD3S3	5.4
AD3S5	5.3	BD3S5	5.0
AG5N0	5.2	BG5N0	5.0
AG3L4	5.1	BG3L4	5.3
AG3L6	5.3	BG3L6	5.4
AG3S3	5.1	BG3S3	5.2
AG3S5	5.3	BG3S5	5.7

VFA가 비교적 낮은 쪽으로 선정하여 가능한 한 소성변형에 저항성이 높게 되도록 하였다. VMA는 국내 규정에는 쓰이지 않지만 미국 등에서 중요한 특성치로서 사용되고 있다. 결정된 각 혼합물들의 최적아스팔트 함량은 표 2에 나타내었다. 이 최적 아스팔트 함량은 본 연구의 실험에 사용된 모든 혼합물에 적용되었다.

3.2 반복주행시험

반복주행시험은 최적아스팔트함량으로 혼합물을 제조하여 시험온도 40℃, 50℃, 60℃에서 하중 70kgf 하에 반복횟수 5,000회까지 실시하였다. 온도별 대표적인 실험 결과 및 기존의 모델식을 이용한 회귀분석 결과는 표 3과 같으며, 그림 2는 온도에 따른 소성변형을 예측하기 위하여 세 개 온도범위에서 반복주행시험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 그림 2에서 보여주듯이 40℃에서의 결과는 혼합물 별로 큰 차이가 없어 이후 본 논문에서는 50℃, 60℃만을 사용하였다.

온도에 의한 소성변형 예측 기본 모델식은 미국 아스팔트 협회(AI)에서 개발한 기본적인 침하량 예측



식을 사용하였다. 사용된 혼합물은 밀입도와 갭입도 모두 사용하였으며 고정된 운하중과 고정된 반복주행횟수 하에서 혼합물별로 온도에 따른 차이를 비교할 수 있었다.

$$h = K_1(T)^{K_2} \quad (1)$$

여기서, h는 침하량, K_1 , K_2 는 재료상수, T는 온도이다. 재료상수를 가지고 혼합물의 소성변형 예측값과 실험치를 비교하여 정확도를 분석하였다. 그 결과는 표 3, 그림 3과 같이 잘 일치하여 결정계수가 0.97 이상으로 나타나 상기의 예측식의 신뢰도가 높은 것으로 나타났다.

반복주행시험 후 혼합물의 단면을 그림 4에 나타

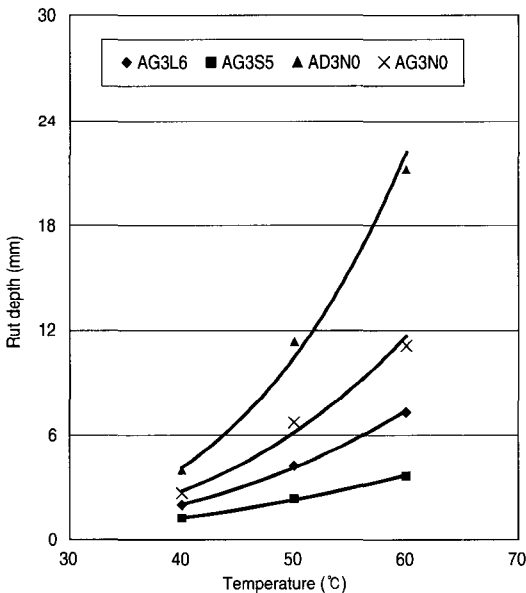


그림 2. Rut depth by variation of temperature

내었으며, 표 4는 50℃와 60℃에서 수행된 반복주행 시험에 따른 동적안정도를 보여주고 있다.

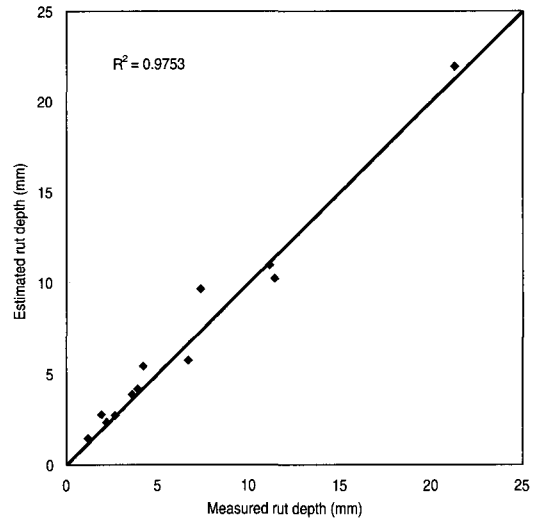


그림 3. Correlation between estimated rut depth and measured rut depth of various asphalt mixtures

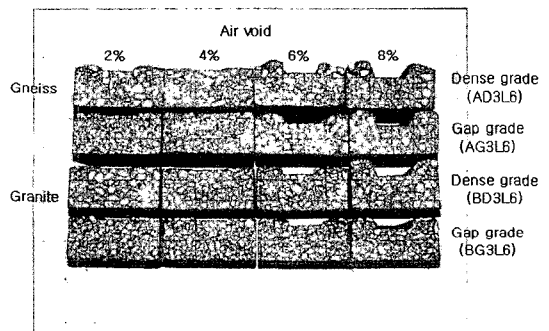


그림 4. Photograph showing rut depth of different mixtures after wheel tracking test

표 3. Regression analysis for rut depth based on temperature for various asphalt mixtures (N=5000)

Mixture types	Regression formula	R ²	Estimated rut depth (mm)					
			40℃		50℃		60℃	
			Measured	Estimated	Measured	Estimated	Measured	Estimated
AD3N0	$h = 1 \times 10^{-6} X^{4.1284}$	0.9929	4.012	4.111	11.351	10.328	21.22	21.924
AG3N0	$h = 6 \times 10^{-6} X^{3.5216}$	0.9882	2.691	2.630	6.728	5.771	11.12	10.967
AG3L6	$h = 2 \times 10^{-5} X^{3.1972}$	0.9987	2.006	2.649	4.256	5.407	7.314	9.686
AG3S5	$h = 7 \times 10^{-5} X^{2.6688}$	0.9978	1.247	1.320	2.360	2.395	3.669	3.896



표 4. Dynamic stability(DS) of gneiss aggregate mixtures at 50℃ and 60℃

Mixture types	DS by air void (cycles/mm) at 50℃				DS by air void (cycles/mm) at 60℃			
	8 %	6 %	4 %	2 %	8 %	6 %	4 %	2 %
AD5N0	-	526	714	526	312	370	666	416
AD3L4	1429	2000	2500	2000	278	270	455	666
AD3L6	3333	5000	5000	5000	666	625	625	1,111
AD3S3	769	1000	909	1250	179	345	385	3,333
AD3S5	1429	3333	2500	3333	400	833	833	1,111
AG5N0	833	1428	2500	1429	714	769	909	909
AG3L4	1250	1666	1429	1000	345	769	1,000	2,000
AG3L6	5000	5000	10000	5000	1,666	2,000	2,500	2,500
AG3S3	344	2500	3333	3333	588	769	1,000	2,000
AG3S5	2500	5000	5000	5000	1,666	2,000	3,333	3,333
BD5N0	909	833	1111	769	909	833	1,111	769
BD3L4	1666	2000	1666	1429	1,666	2,000	1,666	1,429
BD3L6	2500	5000	5000	5000	2,500	5,000	5,000	5,000
BD3S3	833	1250	1111	1000	833	1,250	1,111	1,000
BD3S5	2000	3333	5000	5000	2,000	3,333	5,000	5,000
BG5N0	1250	1666	1429	2000	1,250	1,429	1,666	2,000
BG3L4	3333	3333	2500	1666	3,333	3,333	2,500	1,666
BG3L6	3333	5000	5000	5000	3,333	5,000	5,000	5,000
BG3S3	1000	1666	3333	2000	1,000	1,666	3,333	2,000
BG3S5	1250	2000	2000	2500	1,250	2,000	2,000	2,500

4. 소성변형 추정식 제안

본 장에서는 아스팔트 혼합물의 물성치인 공극률, 골재 간극률(VMA), 포화도(VFA)를 변수로 소성변형을 추정하였다.

4.1 공극률과 소성변형 관계

공극률에 의한 소성변형을 예측하기 위하여 실험 데이터로부터 그림 5와 같이 공극률의 변화에 따른 혼합물의 소성변형 추세 그래프를 그리고 한 예로 경험식 중 하중반복횟수가 4000 사이클일 때의 경험식을 표 5와 6에 제시하였다. 그림 5는 혼합물 중 대표적으로 AG3L6 혼합물을 60℃에서 반복주행 시험하

여 얻은 결과를 보여주고 있다. 그래프는 공극률의 변화에 따른 혼합물의 소성변형을 교통량(반복횟수) 별로 보여주고 있다. 회귀분석에는 소성변형 깊이를 공극률(독립변수)의 종속변수로 하여 2차곡선으로 회귀분석하였다. 표 5, 6의 식들은 간단하게 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$h = K_0 + K_1X + K_2X^2 \quad (2)$$

여기서, h는 반복주행횟수에 따른 소성변형 깊이를 나타내고, k_0, k_1, k_2 는 상수, X는 공극률(%)을 나타낸다. 상수 k_0 은 반복주행횟수에 의존한다. 그리고 k_1, k_2 는 재료상수로서 식(3)과 같이 가정하여 쓸 수 있다.

$$K_i = f_i \cdot N, \quad i=0, 1, 2 \quad (3)$$

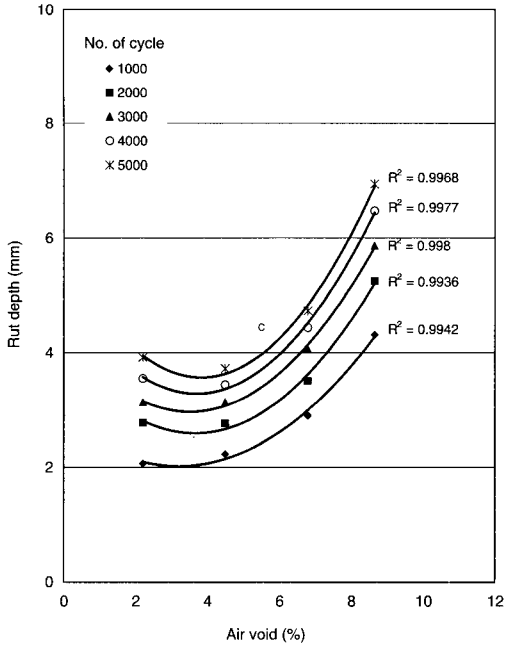


그림 5. A typical rut depth and air void relationship under different number of wheel path for AG3L6 mixture at 60°C

이 식들에서 N 은 반복주행횟수, f_0 은 공극률에 영향을 미치는 재료상수이다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 다음 식 (4)을 얻는다.

$$h = f_0 \cdot N + k_1 \cdot X + k_2 \cdot X^2 \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 고정 소성변형깊이에서의 반복주행횟수와 고정 반복주행횟수에서 소성변형 깊이를 구할 수 있다.

$$N_h = (h - k_1 \cdot X - k_2 \cdot X^2) / f_0 \quad (5)$$

$$h_N = f_0 \cdot N + k_1 \cdot X + k_2 \cdot X^2 \quad (6)$$

상기 모델의 최종 소성변형과 공극률을 이용한 회귀분석을 통하여 재료상수 k_1 , k_2 를 가지고 계산한 소성변형 깊이를 실제 실험값과 비교 결과를 그림 6에서 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험값과 예측값은 상당히 일치함을 보여주고 있어 또한 상관계수도 0.99 이상으로 아주 높아 예측식이 적합함으로 판정된다. 또한 공극률에 따른 소성변형 깊이와

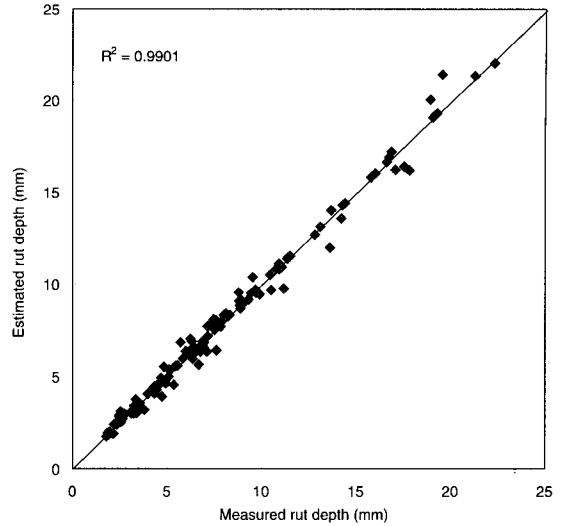


그림 6. Correlation between estimated rut depth based on air void and measured rut depth of all asphalt mixtures

표 5. Regression analysis for rut depth based on air void for various asphalt mixtures at 50°C (N=4000)

Mixture	Regression formula	R ²
AD5N0	$h = 8.8347 + 0.4408X$	0.7055
AD3L4	$h = 4.1219 - 0.1051X + 0.0472X^2$	0.9934
AD3L6	$h = 3.4013 - 0.4764X + 0.0451X^2$	0.8089
AD3S3	$h = 7.6435 - 0.0694X + 0.0408X^2$	0.9844
AD3S5	$h = 8.7295 - 2.1938X + 0.2215X^2$	0.9442
AG5N0	$h = 12.556 - 3.3403X + 0.3877X^2$	0.9437
AG3L4	$h = 15.896 - 3.4615X + 0.3141X^2$	0.8624
AG3L6	$h = 4.341 - 0.926X + 0.0912X^2$	0.9447
AG3S3	$h = 15.296 - 6.8534X + 0.8949X^2$	0.9644
AG3S5	$h = 5.9456 - 1.6351X + 0.1913X^2$	0.9527
BD5N0	$h = 8.501 - 0.6201X + 0.0929X^2$	0.8876
BD3L4	$h = 6.5128 - 1.1666X + 0.154X^2$	0.9697
BD3L6	$h = 3.5062 - 1.0275X + 0.1408X^2$	0.9986
BD3S3	$h = 11.593 - 2.7205X + 0.3378X^2$	0.9944
BD3S5	$h = 2.7201 - 0.1826X + 0.0561X^2$	0.9764
BG5N0	$h = 4.7585 - 0.0037X + 0.0826X^2$	0.7684
BG3L4	$h = 5.6258 - 1.5955X + 0.2097X^2$	0.9991
BG3L6	$h = 2.9868 - 0.8399X + 0.1463X^2$	0.9915
BG3S3	$h = 6.8981 - 2.1815X + 0.3236X^2$	0.9925
BG3S5	$h = 7.2479 - 2.0963X + 0.2755X^2$	0.7747



표 6. Regression analysis of rut depth of air void for various asphalt mixtures at 60℃ (N=4000)

Mixture	Regression formula	R ²
AD5N0	$h=4.0421+0.1395X-0.0468X^2$	0.964
AD3L4	$h=1.2101+3.7934X-0.1668X^2$	0.9528
AD3L6	$h=1.7480+1.8472X-0.0946X^2$	0.9862
AD3S3	$h=17.741-1.6497X+0.3443X^2$	1.0
AD3S5	$h=9.4317-1.8240X+0.306X^2$	0.9923
AG5N0	$h=12.556-3.3403X+0.3877X^2$	1.0
AG3L4	$h=4.7051-0.5345X+0.1226X^2$	0.9911
AG3L6	$h=5.6504-1.1455X+0.1431X^2$	0.9993
AG3S3	$h=6.4807-0.3373X+0.1474X^2$	0.9972
AG3S5	$h=4.0421-0.1395X+0.0468X^2$	0.9558
BD5N0	$h=30.857-5.5398X+0.3898X^2$	0.7468
BD3L4	$h=17.92-5.0007X+0.557X^2$	0.9617
BD3L6	$h=3.8303-0.4857X+0.1021X^2$	0.8943
BD3S3	$h=11.661+1.8626X-0.0708X^2$	0.7653
BD3S5	$h=5.6138+0.7255X-0.0824X^2$	0.4724
BG5N0	$h=10.27-0.8662X+0.2087X^2$	0.9968
BG3L4	$h=5.802-0.8342X+0.1171X^2$	0.9723
BG3L6	$h=2.7347+0.3083X-0.0003X^2$	0.963
BG3S3	$h=10.187-1.4712X+0.1583X^2$	1.0
BG3S5	$h=6.2421-0.6046X+0.1102X^2$	0.9995

의 관계를 그림 5에서 보면 반복회수가 적은 경우 (1000cycle) 최적 공극이 3% 근처에서 반복회수가 5000cycle로 가면서 4%로 근접하는 것을 볼 수 있다. 따라서 교통량(반복회수)이 높을수록 약 4%에서 소성변형이 가장 적게 나타날 것임을 추정할 수 있다.

4.2 VMA와 소성변형 관계

VMA와 소성변형의 관계를 통해 소성변형을 예측하기 위하여 실험데이터로부터 그림 7과 같은 VMA의 변화에 따른 혼합물의 소성변형 추세 그래프를 그렸다. 그리고 소성변형을 추정하기 위한 경험식 중 하중반복회수가 4000 사이클일 때의 경험식을 표 7, 8과 같이 얻었다.

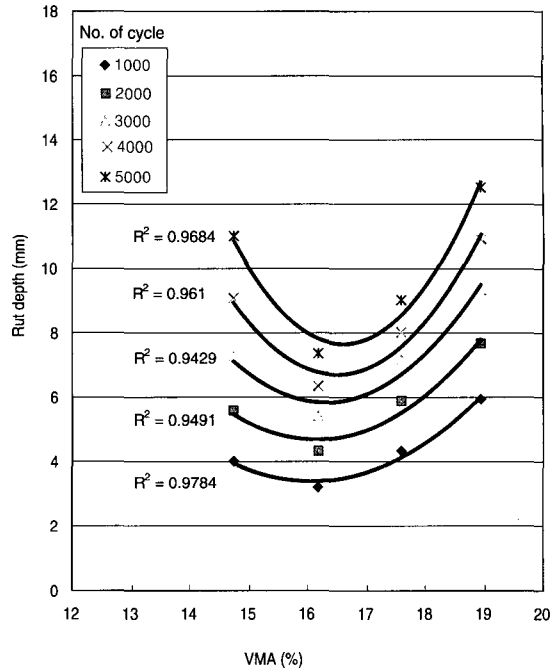


그림 7. A typical rut depth and VMA relationship under different number of wheel path for BD3L4 mixture at 60℃

그림 7은 대표적으로 BG3L4 혼합물을 60℃에서 Wheel tracking 시험하여 얻은 결과이다. 회귀분석에는 소성변형 깊이를 VMA(독립변수)의 종속변수로 하여 2차곡선으로 회귀분석하였다. 표 11, 12의 식들은 간단하게 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$h = m_0 + m_1X + m_2X^2 \quad (7)$$

여기서 h는 반복주행횟수에 따른 소성변형 깊이를 나타내고, m₀, m₁, m₂는 상수, X는 VMA(%)을 나타낸다. 상수 m₀은 반복주행횟수의 함수이다. 그리고 m₁, m₂는 재료상수로서 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$m_i = f_i \cdot N, \quad i = 0, 1, 2 \quad (8)$$

이 식들에서 N은 반복주행횟수, f₀은 VMA에 영향을 미치는 재료상수이다. 식 (8)을 식 (7)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$h = f_0 \cdot N + k_1 \cdot X + k_2 \cdot X^2 \quad (9)$$



표 7. Regression analysis for rut depth based on VMA for various asphalt mixtures at 50℃ (N=4000)

Mixture	Regression formula	R ²
AD5N0	$h = 0.34036 + 0.4548X$	0.9755
AD3L4	$h = 14.745 - 1.6184X + 0.0613X^2$	0.9933
AD3L6	$h = 18.853 - 1.9762X + 0.0584X^2$	0.8084
AD3S3	$h = 16.218 - 1.4737X + 0.0589X^2$	0.9928
AD3S5	$h = 68.515 - 8.1303X + 0.2501X^2$	0.9526
AG5N0	$h = 135.32 - 16.155X + 0.5021X^2$	0.9435
AG3L4	$h = 149.93 - 17.359X + 0.5227X^2$	0.8638
AG3L6	$h = 33.452 - 3.8522X + 0.1179X^2$	0.9454
AG3S3	$h = 276.52 - 35.631X + 1.1569X^2$	0.9645
AG3S5	$h = 68.515 - 8.1303X + 0.2501X^2$	0.9526
BD5N0	$h = 36.784 - 3.7753X + 0.1215X^2$	0.8875
BD3L4	$h = 134.02 - 15.320X + 0.4526X^2$	0.9942
BD3L6	$h = 41.229 - 5.1116X + 0.1656X^2$	0.7227
BD3S3	$h = 121.14 - 14.270X + 0.4426X^2$	0.9946
BD3S5	$h = -19.407 + 2.8793X + 0.0874X^2$	1.0000
BG5N0	$h = 19.260 - 2.4829X + 0.1063X^2$	0.7670
BG3L4	$h = 60.456 - 6.3848X + 0.1764X^2$	0.8668
BG3L6	$h = 27.334 - 3.3261X + 0.1103X^2$	0.8628
BG3S3	$h = 99.714 - 12.741X + 0.4206X^2$	0.9926
BG3S5	$h = -19.407 - 2.8793X - 0.0874X^2$	1.0000

표 8. Regression analysis of rut depth based on VMA for various asphalt mixtures at 60℃ (N=4000)

Mixture	Regression formula	R ²
AD5N0	$h = 5.9681 + 0.7912X$	0.6427
AD3L4	$h = -83.743 + 9.5899X - 0.2158X^2$	0.9525
AD3L6	$h = -42.645 + 5.1249X - 0.1229X^2$	0.9860
AD3S3	$h = 27.264 - 2.0173X + 0.0799X^2$	0.8636
AD3S5	$h = 15.548 - 1.6842X + 0.0609X^2$	0.9562
AG5N0	$h = 104.80 - 11.540X + 0.3456X^2$	1.0000
AG3L4	$h = 150.86 - 20.280X + 0.7095X^2$	0.9793
AG3L6	$h = 47.278 - 5.7064X + 0.1853X^2$	0.9992
AG3S3	$h = 38.607 - 4.9598X + 0.1903X^2$	0.9972
AG3S5	$h = 15.548 - 1.6842X + 0.0609X^2$	0.9562
BD5N0	$h = 191.97 - 19.207X + 0.5101X^2$	0.7468
BD3L4	$h = 44.924 - 4.7791X + 0.1444X^2$	0.7525
BD3L6	$h = 29.746 - 3.7368X + 0.1318X^2$	0.8938
BD3S3	$h = -30.263 + 4.5078X - 0.0939X^2$	0.7648
BD3S5	$h = -34.909 + 3.6467X - 0.0749X^2$	0.9868
BG5N0	$h = 58.465 - 7.2504X + 0.2682X^2$	0.9970
BG3L4	$h = 5.802 - 0.8342X + 0.1171X^2$	0.9723
BG3L6	$h = -1.7401 + 0.3569X - 0.0002X^2$	0.9628
BG3S3	$h = 61.152 - 6.6871X + 0.2056X^2$	1.0000
BG3S5	$h = -34.909 + 3.6467X - 0.0749X^2$	0.9868

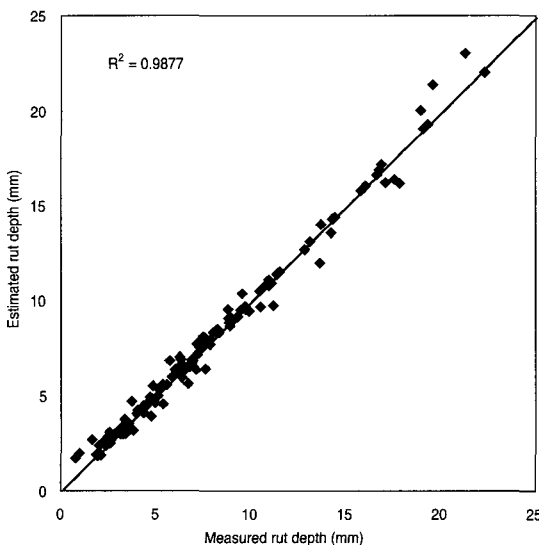


그림 8. Correlation between estimated rut depth based on VMA and measured rut depth of all asphalt mixtures

윗식을 이용하여 고정 소성변형깊이에서의 반복주행횟수와 고정 반복주행횟수에서 소성변형 깊이를 구할 수 있다.

$$N_h = (h - k_1 \cdot X - k_2 \cdot X^2) / f_0 \quad (10)$$

$$h_N = f_0 \cdot N + k_1 \cdot X + k_2 \cdot X^2 \quad (11)$$

상기의 모델의 최종 소성변형과 VMA를 이용한 회귀분석을 통하여 재료상수 m_1 , m_2 를 가지고 계산한 소성변형 깊이를 실제 실험값과 비교 결과를 그림 8에서 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험값과 예측값은 상당히 일치함을 보여주고 있어 또한 상관계수도 0.98 이상으로 아주 높아 예측식이 적합한 것으로 판정된다. 또한 혼합물의 VMA가 약 16%에서 소성변형이 가장 적게 나타나 VMA도 혼합물의 특성에 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다. 따라



서 국내 배합설계 규정에 VMA에 대한 규정의 추가를 심도있게 검토해볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

4.3 VFA와 소성변형 관계

VFA와 소성변형의 관계를 통해 소성변형을 예측하기 위하여 실험데이터로부터 그림 9와 같이 VFA의 변화에 따른 혼합물의 소성변형 추세 그래프를 그리고 소성변형을 예측하기 위한 경험식 중 대표적인 하중반복횟수가 4000사이클일 때의 경험식을 표 9, 10과 같이 얻었다. 그림 9는 여러 혼합물 중 대표적인 혼합물로 AG3L6 혼합물을 60℃에서 Wheel tracking 시험하여 얻은 결과이다. 회귀분석에는 소성변형 깊이를 VFA(독립변수)의 종속변수로 하여 2차곡선으로 회귀분석하였다. 표 9, 10의 식들은 간단하게 식 (12)와 같이 쓸 수 있다.

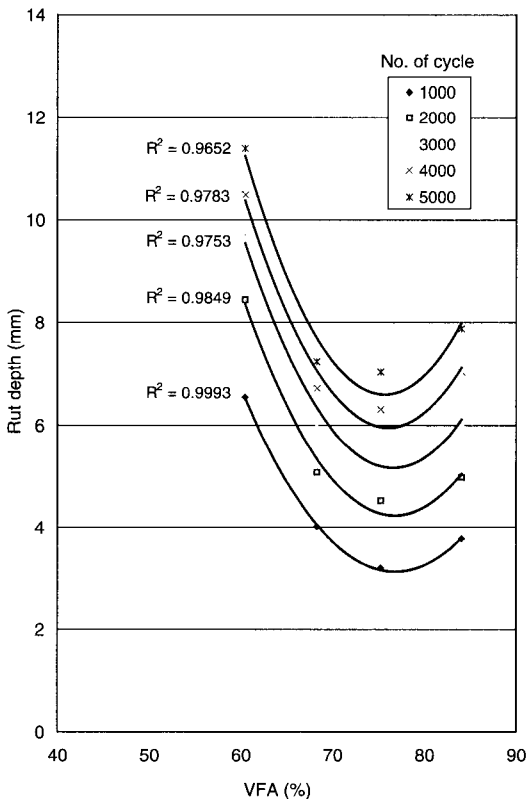


그림 9. A typical rut depth and VFA relationship under different number of wheel path for BD3S3 mixture at 60℃

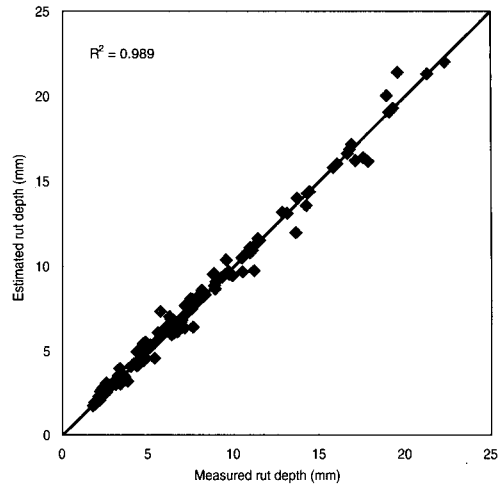


그림 10. Correlation between estimated rut depth based on VFA and measured rut depth of all asphalt mixtures

$$h = a_0 + a_1X + a_2X^2 \quad (12)$$

여기서 h는 반복주행횟수에 따른 소성변형 깊이를 나타내고, a_0, a_1, a_2 는 상수, X는 VFA(%)를 나타낸다. 상수 a_0 은 반복주행횟수에 의존한다. 그리고 a_1, a_2 는 재료상수로서 식 (13)과 같이 가정하여 쓸 수 있다.

$$a_i = f_i \cdot N, \quad i = 0, 1, 2 \quad (13)$$

이 식들에서 N은 반복주행횟수, f_0 은 VFA에 영향을 미치는 재료상수이다. 식 (13)을 식 (12)에 대입하면 식 (14)를 얻는다.

$$h = f_0 \cdot N + k_1 \cdot X + k_2 \cdot X^2 \quad (14)$$

윗식을 이용하여 고정 소성변형깊이에서의 반복주행횟수와 고정 반복주행횟수에서 소성변형 깊이를 구할 수 있다.

$$N_h = (h - k_1 \cdot X - k_2 \cdot X^2)/f_0 \quad (15)$$

$$h_N = f_0 \cdot N + k_1 \cdot X + k_2 \cdot X^2 \quad (16)$$

상기의 모델의 최종 소성변형과 VFA를 이용한 회귀분석을 통하여 재료상수 a_1, a_2 를 가지고 계산한 소성변형 깊이를 실제 실험값과 비교 결과를 그림

표 9. Regression analysis for rut depth based on VFA for various asphalt mixtures at 50℃ (N=4000)

Mixture	Regression formula	R ²
AD5N0	$h = 16.647 - 0.0488X$	0.6493
AD3L4	$h = 32.767 - 0.7059X + 0.0044X^2$	0.9986
AD3L6	$h = 19.174 - 0.488X + 0.0035X^2$	0.8708
AD3S3	$h = 32.869 - 0.5824X + 0.0033X^2$	0.9844
AD3S5	$h = 64.407 - 1.6546X + 0.0111X^2$	0.9090
AG5N0	$h = 140.85 - 3.695X + 0.0252X^2$	0.9676
AG3L4	$h = 105.17 - 2.8419X + 0.0203X^2$	0.9310
AG3L6	$h = 29.419 - 0.7815X + 0.0056X^2$	0.9880
AG3S3	$h = 291.8 - 7.6472X + 0.0504X^2$	0.9352
AG3S5	$h = 64.407 - 1.6546X + 0.0111X^2$	0.9090
BD5N0	$h = 62.629 - 1.4904X + 0.01X^2$	0.9191
BD3L4	$h = 90.5 - 2.3995X + 0.0167X^2$	0.9664
BD3L6	$h = 41.582 - 1.0382X + 0.0068X^2$	0.6599
BD3S3	$h = 111.07 - 2.7633X + 0.0182X^2$	0.9783
BD3S5	$h = 32.52 - 0.7305X + 0.0046X^2$	0.5540
BG5N0	$h = 19.26 - 2.4829X + 0.1063X^2$	0.7670
BG3L4	$h = 43.858 - 1.0216X + 0.0063X^2$	0.8344
BG3L6	$h = 34.583 - 0.8039X + 0.005X^2$	0.8968
BG3S3	$h = 103.39 - 2.5443X + 0.0161X^2$	0.9996
BG3S5	$h = 32.52 - 0.7305X - 0.0046X^2$	0.5540

표 10. Regression analysis of rut depth of VFA for various asphalt mixtures at 60℃ (N=4000)

Mixture	Regression formula	R ²
AD5N0	$h = 21.734 - 0.0104X$	0.5853
AD3L4	$h = 34.946 - 0.1042X - 0.0024X^2$	0.9440
AD3L6	$h = 1.1719 + 0.4077X - 0.0043X^2$	0.9929
AD3S3	$h = 44.373 - 0.6472X + 0.0035X^2$	0.8379
AD3S5	$h = 29.75 - 0.6323X + 0.0039X^2$	0.9702
AG5N0	$h = 80.752 - 2.0045X + 0.014X^2$	0.9999
AG3L4	$h = 212.22 - 5.1598X + 0.0323X^2$	0.9691
AG3L6	$h = 53.613 - 1.3583X + 0.0092X^2$	0.9901
AG3S3	$h = 79.478 - 1.7538X + 0.0105X^2$	0.993
AG3S5	$h = 29.75 - 0.6323X + 0.0039X^2$	0.9702
BD5N0	$h = 114.68 - 3.1844X + 0.0246X^2$	0.6061
BD3L4	$h = 166.34 - 4.3257X + 0.0293X^2$	0.9901
BD3L6	$h = 50.21 - 1.1824X + 0.0074X^2$	0.9199
BD3S3	$h = 45.521 - 0.486X + 0.0016X^2$	0.7635
BD3S5	$h = 15.203 - 0.0581X + 0.001X^2$	0.9888
BG5N0	$h = 58.365 - 8.9985X + 0.3267X^2$	0.9970
BG3L4	$h = 36.34 - 0.8454X + 0.0058X^2$	0.8726
BG3L6	$h = 13.87 - 0.2001X + 0.0009X^2$	0.9653
BG3S3	$h = 30.469 - 0.6658X + 0.0047X^2$	1.0000
BG3S5	$h = 15.203 - 0.0581X + 0.001X^2$	0.9888

10에서 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험 값과 예측값은 상당히 일치함을 보여주고 있어 또한 상관계수도 0.989이상으로 아주 커 예측식이 적합함으로 판정된다.

또한 모든 혼합물의 결과로부터 보면 반복회수 5000cycle일 경우 VFA가 약 72%에서 소성변형이 가장 적고 일단 80%가 넘어가면 전반적으로 다시 커지는 것으로 나타났다. 이를 통해 국내 배합설계 규정값인 75~85%는 비교적 높은 편이며 이보다 낮은 범위에서 소성변형에 관한 한 최적값이 결정됨을 알 수 있었다. 또한 미국의 MS-2에서는 VFA 범위를 65~75%로 규정하고 있고 상기의 실험결과로부터 볼 때 국내 VFA 규정은 적절히 하향 조정하는 구체적인 연구가 필요하다고 사료된다.

5. 결론

본 논문은 아스팔트 포장의 주요 파손 형태의 하나인 소성변형을 예측하기 위한 연구로서 다양한 혼합물의 공극 특성을 가지고 밀입도 및 갭입도 혼합물, 일반 아스팔트 및 개질 아스팔트 혼합물에 관하여 반복주행시험을 수행하였다. 사용된 혼합물의 공극관련 특성을 독립변수로 하여 소성변형깊이 추정에 관한 상관성 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 혼합물의 물리적 특성 중 공극관련 변수로 공극률, VMA, VFA를 사용하여 밀입도 혼합물은 물론 갭입도 혼합물 뿐만 아니라 일반아스팔트 및 개질아스팔트 혼합물의 소성변형깊이의 추정이



가능함을 확인하였다.

2. 국내에서 사용치 않고 있는 물성인 VMA와 소성 변형의 상관관계를 고찰한 결과 VMA는 소성 변형에 크게 영향을 미치는 인자로 판정되어 향후 국내 배합설계규정에 VMA 규격을 추가하는 것을 고려해야 할 것으로 사료된다..
3. VFA 값도 소성변형이 최저가 되는 적정선이 있고 그 이상이 넘어가면 소성변형이 증가하는 것을 확인하였다. 이 결과로부터 국내 규정의 포화도 값은 너무 높아 소성변형을 유발할 경향이 크기 때문에 하향조정이 필요한 것으로 판단된다.
4. 본 연구는 실험실 반복주행 시험을 통해 얻어진 결과를 근거로 이루어진 것이므로 동일하중 재하 조건에서 소성변형을 추정하는데 적용되며, 향후 동일 혼합물의 현장 포장을 추적 조사하여 보다 일반화된 소성변형 추정연구를 수행해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 건설교통부, (1996), “도로표준설계 시공지침”
2. 건설교통부, (1997), “도로현황조사,” pp. 105.
3. 김광우, 이상범, 이지용, (1998), “갹입도 아스팔트 혼합물의 섬유제로 폐신문지의 활용성 연구,” 대한토목학회 학술발표회 논문집(Ⅳ)
4. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애, (1997), “폴리머 (LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성,” 아스팔트 포장공학의 첨단기술 심포지엄 논문집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터, p. 252.
5. “소성변형저감을 위한 시방지침,” (2002), 한국 도로공사

〈접수 : 2004. 6. 18〉

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교 석재복합 신소재제품연구센터의 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.