

삼축압축시험을 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형 파손모형 개발

Development of Asphalt Concrete Rutting Model by Triaxial Compression Test

이관호* · 현성철**

Lee, Kwan-Ho · Hyun, Seong-Cheol

Abstract

This study intends to evaluate of the characteristics of pavement deformation and develop the model for prediction model in the asphalt layer using a regression analysis. In test, there are two different asphalt binders and 5 different aggregate types. The air voids of hot mix asphalt are 6% and 10% for target value. Repeated triaxial compression test with 3 different confining pressures was used for test at 3 different test temperatures. It is going to verify the main parameters for permanent deformation of HMA and to develop the distress model. This paper is to figure out the factor affecting the pavement deformation, and then to develop model the pavement deformation for asphalt mixture. Also, the reliability of prediction model has been studied. The permanent deformation prediction model for asphalt mixtures with temperature, loading time, and air voids has been developed and the proposed permanent deformation prediction model has been validated by using the multiple regression approach which is called Statistical Package for the Social Sciences(SPSS).

Key Words : Hot mix asphalt, Permanent deformation, Regression analysis, SPSS

요 지

본 연구의 목적은 국내 대표 아스팔트 혼합물의 소성변형특성을 평가하고, 이를 이용하여 소성변형을 예측할 수 있는 파손모형을 다중회귀분석을 이용하여 개발하는 것이다. 2가지 아스팔트 바인더와 5종의 골재입도를 이용하였고, 2개의 다른 공극률(6%, 10%)로 시편을 제작하였다. 시험은 30, 45, 60 온도에서 3가지 구속하중을 이용하여 삼축압축 반복재하시험을 수행하였다. 이를 이용하여 소성변형에 영향을 미치는 인자를 규명하고 소성변형 예측모델을 개발하고자 한다. 소성변형 시험의 결과를 이용한 소성변형 예측 모델을 다중회귀분석을 이용하여 제안하였으며 모델의 신뢰도를 분석하였다. 회귀분석을 이용한 소성변형 모델은 AASHTO 2002 설계법에서 제시한 예측식을 기본으로 소성변형에 영향을 미치는 인자인 온도, 하중재하횟수, 공극률을 주요 변수로 하였다. 이를 SPSS 통계프로그램을 이용하여 제시하였으며 실제 시험값과 모델의 예측값으로 신뢰도를 분석하였다.

핵심용어 : 아스팔트 혼합물, 소성변형, 다중회귀분석, SPSS

1. 서 론

도로 포장의 공용성 유지와 수명연장은 포장 유지관리 시스템(Pavement Management System, PMS)의 기본이 되며 도로 포장 자체의 특성, 교통량, 자연환경 등의 영향을 받는다. 아스팔트 콘크리트 포장(Asphalt Concrete Pavement)은 우리나라 전체 도로의 약 90% 정도로 국내 도로 포장의 주종을 이룬다. 아스팔트 콘크리트 포장의 주요파손원인인 소성변형은 교통하중 및 정체구간의 증가, 여름철 온도의 상승으로 인하여 매우 심각한 상황이다. 그러한 이유로 도로의 기능을 상실하고, 사용자에게 큰 불편과 교통사고의 위험성, 빈번한 유지보수로 인하여 많은 예산을 낭비하고 있는 실정이다.

소성변형을 방지하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며

이를 포장설계에 적용하려는 것이 세계적인 추세이다. 미국에서는 신도로연구계획(SHRP: Strategic Highway Research Program)의 연구개발 결과를 통하여 아스팔트 바인더와 혼합물의 점탄성 특성을 고려한 새로운 시험방법과 일련의 시험장비를 개발하여 우수한 공용성의 아스팔트 포장이라는 SUPERPAVE(Superior Performing Asphalt Pavement) 배합설계 방법을 개발하였고, 이 연구의 일환으로 아스팔트 바인더의 공용성(Performance Grade, PG) 규격을 제정하여 사용중이다. 이를 미국·캐나다의 약 6500개소의 기상관측자료를 이용한 온도분석, 도로별 교통량측정, 시험도로의 운영 등으로 신뢰도를 분석하여 포장설계에 사용하여 소성변형 방지에 힘쓰고 있다.

국내 포장설계에 주로 적용되어온 AASHTO 포장설계법은

*정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수(교신저자) (E-mail: kholee@kongju.ac.kr)

**공주대학교 건설환경공학부 석사

1958년에서 1960년까지 일리노이주 오타와시 부근에서 행해진 AASHTO 도로 실험결과로부터 개발되었다. AASHTO 설계법은 기후, 설계, 재료, 노상도 등의 조건에서 적용시킨 경험적인 방법에 근거한 설계법이다. AASHTO 설계법은 교통조건, 재료/시공/교통 예측에 있어서의 변화 가능성과 포장 공용성의 다양한 변화에 대한 신뢰도, 전체 표준편차, 설계 서비스 지수 및 손실량, 설계 유효 노상 지지력 계수 등을 설계 입력 자료로 사용한다. AASHTO 설계법의 장점으로는 간단한 방정식과 노모그래프가 제공되어 설계자들에게 편의를 제공하므로 보다 간단하며 편리하다는 점을 들 수 있으며, 다양한 차량하중, 기후, 재료 조건에 적용 가능한 일반적인 설계모형을 제공한다. 반면에 교통량의 반복 횟수가 작고, 특정 차량 하중이라는 환경 조건에서 얻어진 결과값을 근거로 만들었기 때문에 많은 제한적 요소를 가지고 있다. 또한 경험적으로 포장을 설계하는 것이기 때문에 새로운 재료, 다른 환경에서는 공용성을 고려한 두께설계가 불가능하다. 때문에 여러 가지 도로포장설계 대안들에 대한 비교분석 및 상대적 비교가 쉽지 않다. 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 역학적 이론을 바탕으로 한 역학적-경험적 설계법이 개발되어 사용되고 있다. 이 포장설계법은 먼저 포장구조체의 역학적 분석을 행하여 포장체의 거동을 예측한 후 파손이론을 적용하여 포장의 파손을 예측하고, 포장의 공용성을 예측하는 방법이다. 역학적-경험적 설계방법에 의한 포장의 설계수명 결정은 보다 정확한 포장의 파손예측 모형으로 예측되어야 한다. 그러나 현재는 경험적 파손예측 모형이 주를 이루고 있어 상이한 재료 또는 새로운 혼합물을 사용할 경우 예측식의 적용이 어렵고 혼합물의 노화가 고려되지 않았기 때문에 정확한 수명예측에 한계가 있다. 경험적 파손예측 모형의 이러한 문제 때문에 포장의 파손에 대한 역학적 규명이 필요하고 이를 모형화한 역학적 파손 예측모형이 절실히 요구되고 있다(현성철, 2007).

본 연구에서는 국내에서 많이 사용되고 있는 PG 58-22, PG 64-22, PG 76-22 바인더를 사용하여 총 5종류(표층용 13 mm, 19 mm 아스팔트 혼합물, 기층용 25 mm 아스팔트 혼합물, SMA 13 mm 아스팔트 혼합물, SBS 13 mm 아스팔트 혼합물)의 소성변형특성을 평가하기 위하여 삼축압축 반복재하시험을 수행하고, 이를 이용하여 소성변형에 영향을 미치는 인자를 규명하고, 다중회귀분석을 이용하여 공용성 평가에 이용되는 소성변형 예측모형을 제시하고자 한다.

2. 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성

소성변형과 관련된 많은 연구가 국내외에서 수행되었고, 또한 많은 소성변형 저감대책이 제안되었다. 이러한 저감대책의 근간은 먼저 소성변형 특성을 정확히 평가하는 것이다. 특히, 소성변형의 정확한 예측을 위해 사용되는 방법이나 이론은 주어진 하중에 의한 포장체의 거동특성을 정확히 평가할 수 있어야하고, 또한 재료의 특성을 정확히 반영할 수 있어야한다(허정도 등, 2003, Birgisson et al., 2001, Kaloush et al., 2002). 소성변형 특성 평가에 이용되는 방법은 크게 3가지로

나누어 볼 수 있다. 즉, 회귀분석을 이용한 경험적 방법, 구성방정식을 이용한 소성변형 이용법, 실험결과를 이용한 방정식으로 구분해 볼 수 있다(Carpenter and Vavrik, 2001). 이러한 다양한 해석방법을 이용한 영구변형특성평가 결과, 영구변형에 상당한 영향을 주는 요소로는 온도, 하중반복횟수 및 재하시간, 혼합물특성 및 응력상태등이 있다. 일부분의 모델은 영구변형특성 평가시 일축압축응력(σ_1)과 수평응력(σ_2)를 이용하였다. 이러한 시험들을 이용한 많은 연구결과를 표 1로 정리하였다(전주용, 2003).

소성변형은 아스팔트 혼합물의 압밀화(densification)와 전단변형(shear deformation)에 의해서 주로 발생한다(Zhou et al., 2004). 삼축압축 반복재하시험의 전형적인 결과로서 소성변형률과 하중재하횟수의 관계는 그림 1과 같다. 2단계 변형(Secondary) 구간까지는 압밀화에 의한 변형이, 3단계 변형(Tertiary) 구간부터는 전단에 의한 변형이 지배적으로 작용한다. 또한 3단계 구간이 시작되는 B점을 흐름점이라 하며, 이때의 하중 재하횟수를 흐름값(Flow Number : FN)이라고 한다.

소성변형은 시간이나 하중 재하수의 함수로서 Power law 관계와 근접한다. 그 기본 이론은 일정범위의 하중 작용 횟수 내에서 반복하중의 작용횟수와 소성변형률 사이에는 대수적 관계가 있으며 식으로 설명될 수 있다. Power law 모델은 반복크리프시험을 통하여 개발된 모델이므로 아스팔트포장의 반복되는 교통하중 조건을 잘 모사할 수 있기 때문에 모델로 선정하였다.

2단계 구간에서의 누적된 소성 변형률과 하중의 재하횟수 관계는 $\epsilon_p = aN^b$ 식으로 나타낼 수 있다. 여기서, ϵ_p 는 누적 소성변형률, N 은 하중재하횟수, a 는 전대수상의 직선의 절편 ($N=1$), b 는 전대수상의 직선의 기울기를 의미하고, 이 모델에서 상수 a , b 는 반복하중 하에 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 설명하는데 주로 사용되고 있다. 이러한 상수들은 아스팔트 재료의 특성과 시험조건에 의해 변화한다. 상수 a 는 하중 재하 횟수가 1일 때의 소성변형률을 의미하며, 상수 b 는 하중 재하 횟수에 따른 소성변형률의 변화율을 의미한다. 누적된 소성변형률을 하중 재하 횟수로 미분하여 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \epsilon_p}{\partial N} = \epsilon_{pn} = \frac{\partial (aN^b)}{\partial N} \quad \text{또는,} \quad \epsilon_{pn} = abN^{(b-1)} \quad (1)$$

회복변형률(ϵ_r)은 일반적으로 하중재하횟수에 대하여 독립적인 것으로 볼 수 있기 때문에, 양변을 회복변형률(ϵ_r)로 나누어주면 회복변형률에 대한 소성변형률의 비율을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\epsilon_{pn}}{\epsilon_r} = \frac{ab}{\epsilon_r} N^{(b-1)} \quad (2)$$

여기에, $\mu = \frac{ab}{\epsilon_r}$, $a = 1 - b$ 를 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

표 1. 소성변형 특성 평가실험법 (전주용, 2003)

발표자	해석방법	예측모델	파라미터	실험법	비고
Monismith Inkabi Freeme McLean (1977)	ELSYM Layered elastic, layer strain	$\epsilon_z^p = [\delta(T)N^a \sigma^{n-1} t] \left[\sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \right]$	ϵ_z^p : 연직소성변형 $\delta(T)$: 온도 N: 하중반복횟수	반복삼축 압축시험	측하중 및 하중분포고려
Brown Bell (1979)	DEFPav Nonlinea FEM, layer strain	$\epsilon_p = \frac{q^b}{a} (N)$	q: 축차응력 a, b: 상수 N: 하중반복횟수	연직반복 하중	시험도로결과와 좋은 상관관계
Meyer Haas (1977)	FEPAVE II Finite Element Layer Strain	$\epsilon_p = f(\sigma_1, \sigma_3, T, AV, N) \pm E$	AV: air void T: temperature E: error	반복 삼축하중	측정치와 예측치 상관관계 좋음
Kenis (1977)	VESYS probabilitic linear viselastic	$\epsilon_p(N) = e \mu N^{-a}$	e: 최대하중시 변형 α : 1-S $\mu = IS/e$	일축 반복하중	VESYS 방법이용
Francken (1977)		$\epsilon_p(t) = At^B + C(\exp Dt - 1)$ $\epsilon_p(t) = At^B$	A, B, C, D: 입력변수 t: 시간	삼축동재하 시험	소성변형 경향평가
Verstraeten Romain Veverka (1982)	Elastic layer Layer strain Theory	$\epsilon_p(t) = A \left(\frac{t}{1000^3} \right)^B = \frac{C(\sigma_1 - \sigma_3)}{E^* \left(\frac{t}{1000} \right)^B}$	A, B: 입력상수 C = f(Vb, Vv) E*: modulus	삼축동재하 시험	16개 시험도로 적용결과 : 만족할 만한 수준
Mahboub Little (1988)		$\frac{\epsilon_{vp}}{N} = a \sigma^b$	ϵ_{vp}/N : visco. plastic deform. σ : 최대반복응력	일축 크립시험	
Tseng Lytton (1986)		$\epsilon_a = \epsilon_o \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{n} \right)^b \right]$	ϵ_a : 연구변형 N: 하중반복횟수 ρ, b : 회귀분석	반복하중 시험	
Uzan (1982)		$\epsilon_p(N) = \epsilon_r \mu N^{-a}$	ϵ_p : 영구변형 ϵ_r : 탄성변형	반복 하중시험	
Leahy (1989)		$\epsilon_p = f(T, \sigma_d, V_{air}, N, \eta_{asp}, P'_{wasp})$	sd: 축차응력 P'wasp: 유효 아스팔트 함량	반복축하중 시험	

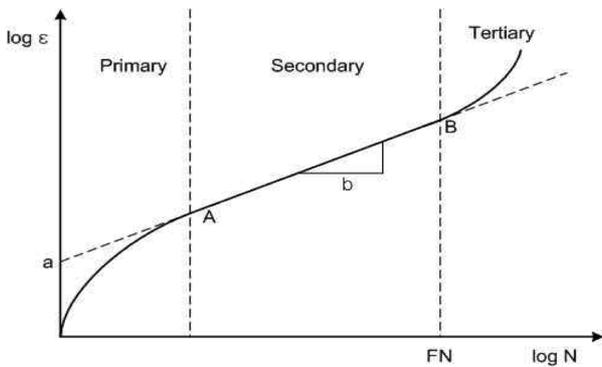


그림 1. 소성변형률과 하중재하횟수

$$\frac{\epsilon_{pn}}{\epsilon_r} = \mu N^{-a} \quad (3)$$

여기서, ϵ_{pn} 는 N번째 하중재하시 발생하는 소성변형률, μ 는 N=1일 때의 소성변형률과 탄성변형률 사이의 비례상수, a 는 하중재하횟수가 증가함에 따른 소성변형 증가량의 감소율을 의미한다. 소성변형 인자인 a 와 b 는 보편적으로 사용되고 있는 지수함수(Power Law)의 소성변형인자이며, μ 와 a 는 VESYS모델의 소성변형인자이다. 여기서 하중재하에 따른 소성변형이 급속도로 발생하는 3단계(tertiary)에서는 적용할 수 없고 1단계(primary), 2단계(secondary) 구간에서만 재료의 소성변형을 정의할 수 있다. 이러한 소성변형 인자는 온도와

하중 및 공극률에 대한 함수로 나타낼 수 있으며, 모든 조건에서 시험이 수행되면 최종적으로 소성변형모델이 개발되어 다음의 식과 같이 표현할 수 있다(박희문 등, 2005).

$$\epsilon_p = a(T, \sigma, AV) N^{b(T, \sigma, AV)} \quad (4)$$

$$\frac{\epsilon_{pn}}{\epsilon_r} = \mu(T, \sigma, AV) N^{-a(T, \sigma, AV)} \quad (5)$$

여기서, T는 온도(°C), σ 는 재하응력, AV는 공극률(%)을 의미한다.

3. 실험재료의 기본물성

3.1 소성변형 시험조건

본 연구에서는 국내에서 일반적으로 사용되는 표층재료인 밀입도 13 mm, 19 mm의 골재와 기층용 재료 25 mm의 PG 54-22, PG 64-22를 사용한 혼합물, SMA, SBS 혼합물을 사용하였으며, 사용된 골재는 화강암이다. 총 5종의 아스팔트 혼합물의 공극률, 온도 재하하중에 따른 소성변형특성을 평가하였다. 공극률, 온도, 재하하중이 소성변형에 미치는 영향을 파악하기 위하여 표 2에서와 같이 시험계획을 수립하였다. SMA 아스팔트 혼합물의 경우 골재 입도 13 mm, 개질아스팔트 혼합물의 경우 PG76-22 바인더 조건을 이용하였다. 실

표 2. 표층/기층용 혼합물 소성변형 시험 변수

변수종류	종류	갯수
골재의 입도	13 mm, 19 mm 25 mm	3
아스팔트 바인더	PG 58-22 , PG 64-22	2
공극률 (%)	6%, 8%, 10%	3
시험 온도(°)	30, 45, 60	3
하중재하크기	827kPa, 689kPa, 551kPa	3

험방법은 NCHRP Report 465 “Simple Performance Test for Superpave Mix Design”에서 추천하는 삼축압축 반복재하 시험(Triaxial Compressive Repeated Loading Test)을 사용하였다. 이 시험 방법은 시험 방법이 비교적 간단하며, 현장의 하중조건과 응력상태를 실내에서 모사할 수 있는 장점이 있다.

3.2 배합설계 및 실험결과

혼합물에 사용된 골재는 국내에서 가장 많이 이용되는 화강암 종류를 사용하였으며, 아스팔트 혼합물의 배합설계는 수퍼페이브 Level 1 방법에 의해 수행되었다. 소성변형 시험용 시편은 직경 150 mm, 높이 170 mm의 원통형 시편을 선회다짐기를 사용하여 제작한 직경 100 mm의 시편을 코어채취기로 채취하여 시편 상부 및 하부를 10 mm 씩 절단하여 높이 150 mm의 시편을 제작하였다. 시편을 코어 및 절단한 후 시편 내부의 수분을 제거하기 위하여, 25°C의 챔버에 방습제인 실리카겔(silica gel)을 함께 넣어 3일간 건조시켰다. 이렇게 건조시킨 시편은 공기와의 접촉을 차단하기 위하여 랩으

로 감싼 후 서늘한 곳에서 보관하였다. 시험에 이용된 아스팔트 혼합물의 부피특성을 표 3에 정리하였다.

4. 실험결과분석

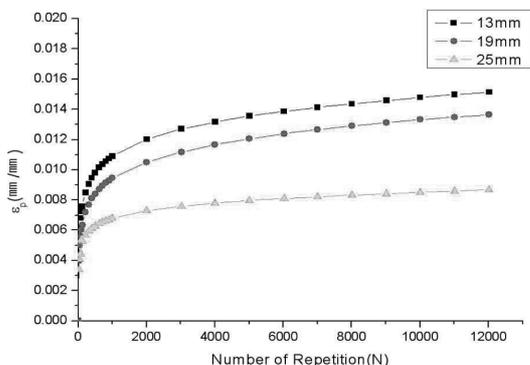
4.1 삼축압축 실험결과

그림 2는 주어진 아스팔트 혼합물의 8% 공극률과 온도에서 하중재하횟수에 따른 소성변형율과 회복변형률의 변화를 보여주고 있다. 같은 공극률 조건에서 시험온도가 올라갈수록 소성변형률이 증가하였으며, 같은 온도조건에서도 공극률이 높을수록 혼합물의 소성변형율이 증가함을 알 수 있다. 모든 시험에서 10,000회 이상 시험이 진행되어도 소성변형율의 안정된 값을 유지하며 전단에 의한 소성변형이 발생하지 않았고, 아스팔트 혼합물의 압밀에 의한 변형만 관찰할 수 있었다. 회복변형률은 온도와 공극률과 관계없이 하중재하 횟수가 1,000회 정도 이후부터 안정화 되는 경향을 보였다. 그림 3은 개질 아스팔트 혼합물 SMA와 SBS 혼합물의 소성변형특성 비교 그림이다. SBS혼합물이 SMA혼합물에 비해서 20~30%정도 작은 소성변형특성으로 보였다. 그림 4는 일반 및 개질 아스팔트 소성변형 특성 비교 그림이다. 이 그림에서 보면 일반 아스팔트 혼합물에 비해 개질 아스팔트의 소성변형 특성이 50%이상 작게 나타나 소성변형에 월등히 강하다는 것을 알 수 있다.

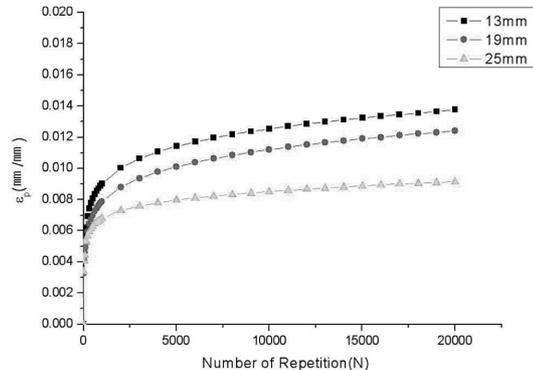
시험 결과 20,000회 까지 다짐이 진행되어도 전단파괴에 의해 발생하는 3단계(Tertiary) 구간은 발생하지 않았으며 압밀화에 의한 변형을 그래프로 확인할 수 있었다. 이는 삼축

표 3. 아스팔트 혼합물의 부피특성

혼합물 종류			AC Cont.	% G _{mm} at N _{ini}	% G _{mm} at N _{des}	% G _{mm} at N _{max}	% Air Voids	% VMA	% VFA
혼합물	입경	바인더							
표층용	13 mm	AP-3	5.2	88.2	96.0	97.1	4.0	15.4	74.0
		AP-5	5.3	89.4	96.0	97.2	4.0	15.8	75.1
표층용	19 mm	AP-3	5.1	85.9	96.0	97.5	4.0	15.1	73.5
		AP-5	5.1	86.3	96.0	97.3	4.0	15.5	74.6
기층용	25 mm	AP-3	4.3	87.6	96.0	96.9	4.0	13.6	70.6
		AP-5	4.5	88.2	96.0	97.0	4.0	13.9	71.1
SMA	13 mm	AP-3	5.7	82.6	96.0	97.7	4.0	16.9	76.3
		AP-5	5.7	83.3	96.0	97.7	4.0	16.3	75.5
SBS	13 mm	PG 76-22	4.6	88.9	96.0	97.3	4.0	15.5	74.2



일반 혼합물 PG58-22 60C 827kpa



일반 혼합물 PG64-22 60C 827kpa

그림 2. 일반 혼합물 PG58-22와 PG64-22 60°C 829 kpa 소성변형특성 비교

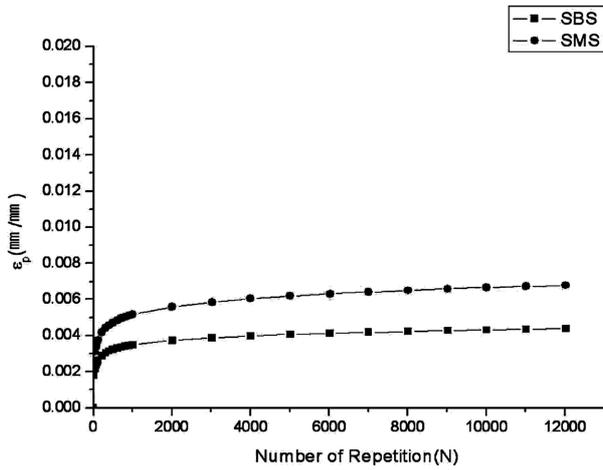


그림 3. 개질 아스팔트 혼합물 비교

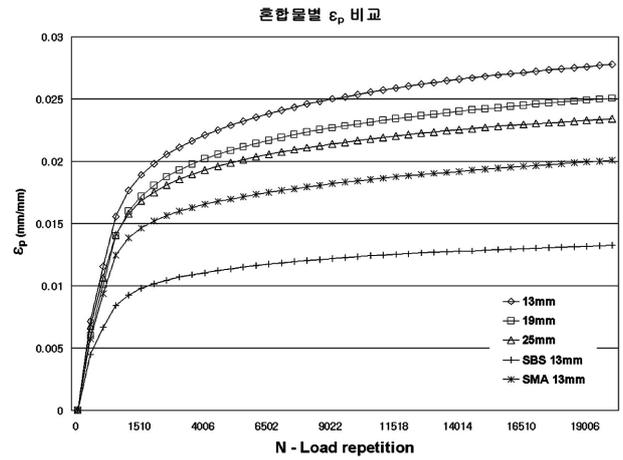


그림 5. 혼합물별 εp 비교

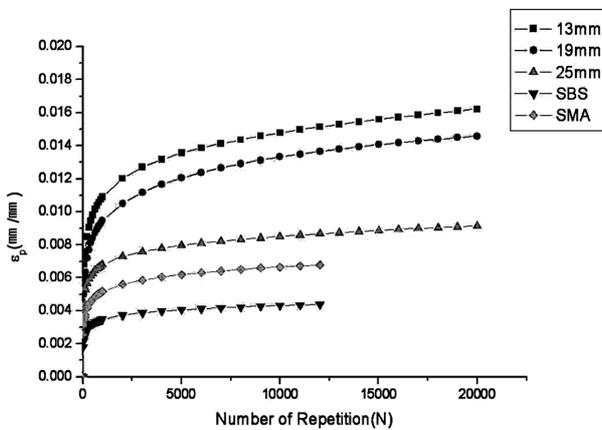


그림 4. 소성변형 특성 비교

압축 반복하중 시험의 구속하중 138kPa(20psi)이 시험시편의 전단변형을 방지하는 것으로 판단된다. 시험결과 혼합물들의 소성변형률(ϵ_p) 값을 비교해보면 그 크기가 전반적으로 다음과 같이 나타난다.

$$6\%-30^\circ\text{C} < 10\%-30^\circ\text{C} < 6\%-45^\circ\text{C} < 6\%-60^\circ\text{C} < 10\%-45^\circ\text{C} < 10\%-60^\circ\text{C}$$

이러한 순서를 통하여 공극률(AV), 시험온도(T), 다짐횟수(N)가 증가할수록 소성변형률(ϵ_p) 값이 증가함을 알 수 있다. 소성변형률/회복변형률(ϵ_p/ϵ_r) 값을 비교해 보면 전반적으로 다음과 같이 나타난다.

$$6\%-60^\circ\text{C} < 6\%-45^\circ\text{C} < 10\%-60^\circ\text{C} < 6\%-30^\circ\text{C} < 10\%-45^\circ\text{C} < 10\%-30^\circ\text{C}$$

주목할 점은 다짐횟수와 공극에 대해서는 양(+)의 상관관계를 가지지만 시험온도에 대해서 음(-)의 상관관계를 가지는 것이다. 이는 앞서 설명한 회복변형률(ϵ_r) 값들이 온도에 대한 갭(gap)이 너무 커서 소성변형률/회복변형률(ϵ_p/ϵ_r) 값에서는 그 관계가 역전되어 온도가 음(-)의 상관관계로 나타난다고 판단된다. 시험에 사용한 5가지 아스팔트 혼합물의 소성변형률(ϵ_p) 값을 비교하면 그림 5의 그래프와 같다. 그래프에서

나타나는 값들의 크기는 다음과 같다.

$$\text{SBS } 13 \text{ mm} < \text{SMA } 13 \text{ mm} < \text{밀입도 } 25 \text{ mm} < \text{밀입도 } 19 \text{ mm} < \text{밀입도 } 13 \text{ mm}$$

이러한 순서는 개질 아스팔트 혼합물이 일반 밀입도 아스팔트 혼합물에 비해 소성변형에 강하며 사용 골재의 입도가 클수록 소성변형에 강함을 알 수 있다.

소성변형 모형의 2단계(Secondary) 구간은 압밀화에 의해 변형이 일어난다. 2단계 구간에서의 누적된 소성 변형률과 하중의 재하횟수 관계는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_p = aN^b \quad (6)$$

여기서, ϵ_p : 누적소성변형률,

N: 하중재하횟수,

a: 전대수상의 직선의 절편(N=1),

b: 전대수상의 직선의 기울기.

이 모델에서 상수 a, b는 반복하중 하에 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 설명하는데 주로 사용되고 있다. 이러한 상수들은 아스팔트 재료의 특성과 시험조건에 의해 변화한다. 상수 a는 하중 재하 횟수가 1일 때의 소성변형율을 의미하며, 상수 b는 하중 재하 횟수에 따른 소성변형율의 변화율을 의미한다. 소성변형 모형의 2단계(Secondary) 구간을 구하는 방법에는 그 시작점 A가 1단계 구간에서 $D_e(D_e = \frac{\Delta}{\epsilon_p} \times 100)$ 가 3%가 되는 지점이라 보는 방법(Lijun Sun, 2004)이 있다. 이 방법은 시작점(변곡점) A가 너무 1단계 구간에 치우치는 결과를 나타내었다. 그래서 본 연구에서는 경험적인 방법으로 시험당 총 2만회의 Cycle 중 1만회 이상 값들의 경향을 파악하여 2단계구간을 설정하였고 $\epsilon_p = aN^b$ 의 인자인 a, b를 구하여 표 4에 나타내었다. 두 값 모두 전반적으로 온도와 공극률이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 a값은 혼합물별 ϵ_p 을 비교한 값과 유사한 경향을 보인다. 하지만 부분적으로 경향에 맞지 않는 다른 값들이 섞여 있어 소성변형 특성을 정확히 파악하기에는 어려우며 더 많

표 4. 아스팔트 혼합물별 a와 b값

아스팔트혼합물	변수	공극	PG 58-22			PG 64-22			
			30°C	45°C	60°C	30°C	45°C	60°C	
밀입도 13 mm	a	6%	0.0051	0.0062	0.0047	0.0057	0.0068	0.0069	
		10%	0.0056	0.0154	0.0148	0.0106	0.0048	0.0192	
	b	6%	0.0687	0.1101	0.1949	0.079	0.0894	0.1316	
		10%	0.1114	0.0866	0.997	0.0859	0.1969	0.1078	
밀입도 19 mm	a	6%	0.0052	0.0056	0.0073	0.0057	0.0047	0.0076	
		10%	0.0044	0.0101	0.0155	0.0066	0.0101	0.0123	
	b	6%	0.0490	0.0885	0.1225	0.0584	0.1288	0.1337	
		10%	0.1106	0.1176	0.1284	0.0702	0.1175	0.1463	
밀입도 25 mm	a	6%	0.0043	0.0054	0.0076	0.0066	0.0057	0.0079	
		10%	0.0057	0.0092	0.0156	0.0057	0.0082	0.0170	
	b	6%	0.0913	0.1006	0.1247	0.0474	0.1032	0.1024	
		10%	0.1232	0.1211	0.1066	0.1096	0.1260	0.0891	
SMA 13 mm	a	6%	0.0039	0.0075	0.0056	0.0058	0.0076	0.0078	
		10%	0.0055	0.0094	0.0067	0.0028	0.0029	0.0093	
	b	6%	0.0831	0.0803	0.1299	0.0591	0.083	0.1111	
		10%	0.1075	0.0966	0.1688	0.1512	0.1964	0.1346	
개질 13 mm		PG 76-22							
		a	6%	0.0032	0.0036	0.0068			
			10%	0.0042	0.0039	0.0078			
		b	6%	0.0628	0.0897	0.0800			
10%	0.1034		0.1311	0.1134					

은 시험자료가 필요한 것으로 판단된다.

4.2 파손모형개발을 위한 다중회귀분석

다중회귀분석이란 2개 이상의 독립변수의 관련성을 규명할 수 있는 수학적 모형을 측정된 변수들의 자료로부터 추정하는 통계적 방법이다. 이 추정된 모형을 사용하여 예측을 하거나 관심있는 통계적 추론 등을 하게 된다. 독립변수가 2 이상인 경우에는 다중회귀모형(multiple regression model)이라고 한다(서혜선, 2003).

분석대상이 되는 자료는 n개의 관찰개체들로부터 얻은 종속(또는 반응)변수 y와 p(≥ 2)개의 독립(또는 설명)변수 x₁, x₂, ..., x_i, ..., x_p에 대한 관찰값으로 구성된다. 여기서 변수 y와 x₁, x₂, ..., x_i, ..., x_p와의 관계는 다음과 같은 선형모형,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_j x_{ij} + \dots + \beta_p x_{ip} + u_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

으로 규정된다. 단 β₀, β₁, β₂, ..., β_p는 편회귀계수(또는 간단히 회귀계수)라 부르는 상수이며, p번째 관찰개체에 대한 오차항 u_i는 확률변량이다. 구체적으로 y_i는 근사적으로 x_i들의 선형합수이고 u_i는 그 근사에서의 차이를 측정하며, 특히 u_i는 어떤 형식의 체계적인 정보도 포함되어 있지 않은 서로 독립적인 정규확률 변량으로 모평균 0과 모분산 σ²을 가진다고 가정한다. 또한 회귀계수 β_j가 가지는 의미는 x_j를 제외한 나머지 모든 독립들을 고정시킨 상태에서, x_j의 1단위 증가에 따른 y

의 증분으로 해석할 수 있다. 회귀계수는 최소제곱법을 적요해서 회귀계수 β들에 대한 추정량을 구할 수 있다. 본 연구에서는 통계 패키지 프로그램인 SPSS를 사용하여 다중회귀분석을 실시하였고, 그림 6은 프로그램 해석결과를 나타낸다. 본 연구에서는 온도와 하중재하횟수와 더불어 공극률 또한 소성변형에 영향을 미치는 인자로 규명되었다. 이상의 시

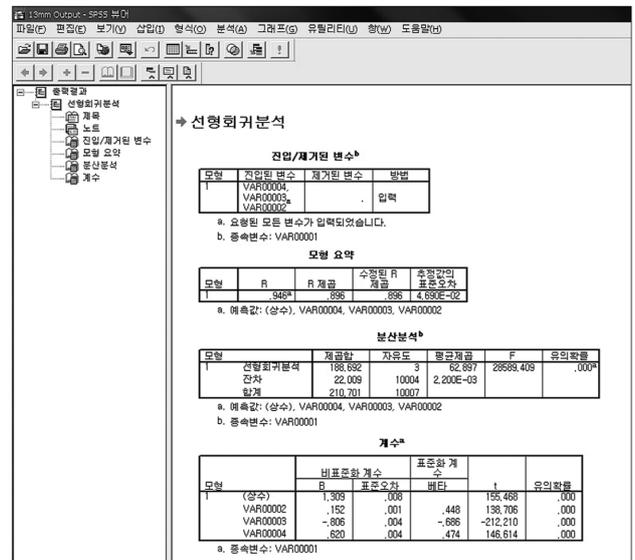


그림 6. SPSS를 통한 회귀분석

험결과를 토대로 다중회귀분석을 통하여 다음과 같은 소성변형 예측 모델을 개발하였다. 표 5에 제시된 모델은 5종류의 혼합물과 시험온도 및 3개의 공극률 및 하중재하 횟수를 매개변수로 갖는 전체 데이터에서 무작위(Random sampling)을 통하여 모델을 개발하였다. 그림 7은 밀입도 13 mm의 실측값과 예측값의 상관관계를 나타낸다. 예측값은 표 5에서 결정된 파손모형을 적용하여 얻어진 결과값을 이용하였다. 다중회귀분석을 통하여 도출된 모수의 추정값 및 그에 따른 t-값과 유의 확률(P-value)은 표 6과 같으며 수정된 R²이 3가지 모델이 전부 0.800이상 값을 나타내어 다중회귀분석을 통한 소성변형예측모델의 설명력이 높음을 알 수 있다. 표준화계수는 지정된 매개변수 이외의 모든 매개변수가 변하지 않고 지정된 매개변수가 1단위 변할 때 종속변수가 변하는 정도는 나타낸 것으로 공극률의 표준화 계수 평균이 0.659가 하중재하횟수 0.378 그리고 시험온도 0.112에 비하여 약 2배 및 약 6배 영향력이 큰 것으로 나타났다. 표 7과 그림 8은 파손모형을 이용한 전체혼합물의 예측값과 실험 결과값을 비교한 것이다. 실제 실험값과 개발된 모델로부터 도출된 예측값과의 산점도를 나타내며, 실험값과 예측값 사이

표 5. 아스팔트 혼합물별 소성변형 파손모형

아스팔트 혼합물	파손모형 제안식
표층 13 mm	$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-1.382} N^{0.143} T^{0.387} AV^{1.272}$
표층 19 mm	$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-1.179} N^{0.178} T^{0.372} AV^{0.943}$
기층 25 mm	$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-1.102} N^{0.134} T^{0.339} AV^{1.025}$
SMA 13 mm	$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-1.102} N^{0.134} T^{0.339} AV^{1.025}$
개질 13 mm	$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-1.102} N^{0.134} T^{0.339} AV^{1.025}$
전체 혼합물	$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{0.9140} N^{0.1416} T^{-0.4659} AV^{0.4953}$

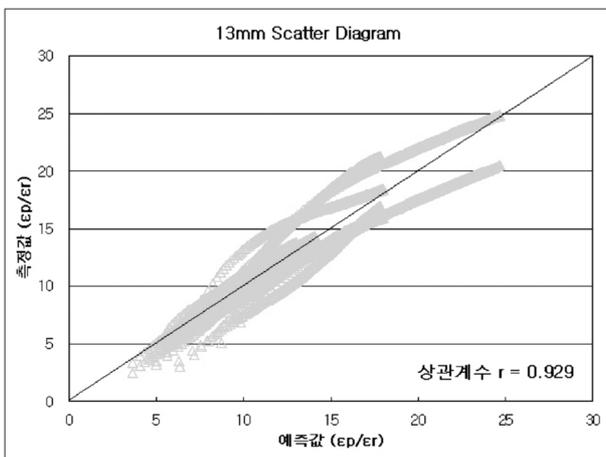


그림 7. 밀입도 13 mm 산점도

표 6. 13 mm 아스팔트 혼합물 회귀분석 통계량

	표준오차	표준화계수	t-값	유의확률 (P-value)
상수	0.0042	-	-32.570	0.0001
하중재하횟수	0.0030	0.408	46.235	0.0001
시험온도	0.0028	0.132	19.111	0.0001
공극률	0.0020	0.653	50.062	0.0001

표 7. 전체 혼합물의 회귀분석 통계량

	표준오차	표준화계수	t-값	유의확률
상수	0.008	-	110.662	< 0.0001
하중재하횟수	0.001	0.437	133.455	< 0.0001
시험온도	0.004	-0.412	-125.953	< 0.0001
공극률	0.004	0.396	121.054	< 0.0001

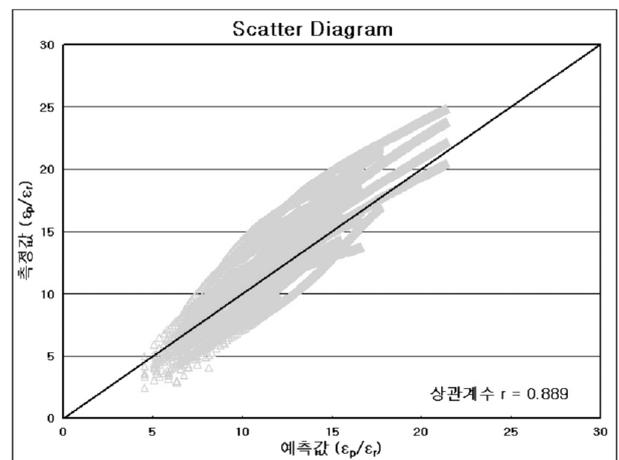


그림 8. 전체 혼합물의 산점도

의 상관계수 0.889로 개발된 모델로부터 예측값이 실제 실험값과 아주 근사함을 나타내고 있다. 결론적으로 본 연구에서 개발된 소성변형예측모델을 통하여 아스팔트의 소성변형에 영향을 미치는 인자들의 영향력을 규명하였으며, 그에 따른 소성변형에 대한 예측을 가능하게 할 수 있게 되었다.

5. 결 론

선회다짐기를 이용한 배합설계 자료로부터 아스팔트 혼합물의 공용성 평가를 위한 분석을 실시하였고, 제한한 종류의 아스팔트 혼합물을 대상으로 하였지만 의미 있는 결과를 다음과 같이 도출하였다.

- (1) 본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 소성변형 시험의 결과를 이용하여 다중회귀분석을 사용한 소성변형 예측 모델을 제안하였다. 아스팔트 혼합물은 PG 58-22, PG 64-22, PG 76-22의 3가지 종류와 화강암 골재를 사용하여 표층재료인 밀입도 13 mm, 19 mm와 기층용 밀입도 25 mm 그리고 SMA 13 mm, SBS 13 mm 개질아스팔트 혼합물을 제작하였다. 준비된 5종의 아스팔트 혼합물을 공극률(AV), 온도(T) 하중재하횟수(N)에 따른

소성변형특성을 파악하였다.

- (2) 삼축압축 반복재하시험법을 사용하여 소성변형 시험을 실시한 결과 같은 공극률 조건에서 아스팔트 혼합물은 온도가 증가할수록 소성변형이 증가하였으며, 같은 온도조건에서는 공극률이 높을수록 혼합물의 소성변형이 증가하였다. 제안한 예측모델을 측정값과 비교한 결과 높은 상관계수(r)를 확인할 수 있었고 이것은 예측모델이 높은 신뢰도를 가짐을 나타낸다.
- (3) 소성변형 예측모델을 현장에 적용시키기 위해서는 현장 자료와의 검증이 필요하다. APT 등의 장비를 사용하여 아스팔트 혼합물의 현장 적용을 위한 소성변형 예측모델 개발이 진행 중이며 LTPP(Long Term Pavement Performance)와 같은 시험도로에서 얻어지는 자료를 이용하여 실내시험결과로부터 제안된 아스팔트 포장의 소성변형 파손모형을 검증하면 현장에 적용이 가능한 수정된 예측모형을 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시재생사업단 지원으로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

박희문, 최지영, 박성환 (2005), 19 mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 소성변형 예측 모델 개발, 한국도로학회 논문집

서혜선 (2003), SPSS를 활용한 회귀분석, SPSS아카데미

전주용 (2003), 슬래그와 폐주물사를 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형, 경성대학교 석사학위논문, pp. 69

허정도, 추상혁, 최한길 (2003), 소성변형으로 인한 아스팔트 혼합물의 파괴거동, 한국도로학회 논문집.

현성철 (2007), 회귀분석과 인공신경망을 이용한 아스팔트 혼합물의 소성변형 모델, 공주대학교 석사논문, pp. 77

Birgisson, B., Darku, D. D., Roque, R., Ruth, B. E. (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.

Carpenter, S. H. and Vavrik, W. R. (2001), *Repeated Triaxial Testing During Mix Design For Performance Characterization*, 2001 Annual Transportation Research Board Meeting

Kaloush, K. E. and Witzak, M. (2002), *Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixture*, 2002 Annual Transportation Research Board Meeting

Zhou, E., Scullion, T. Sun, L. (2004), *Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 130 No. -494

◎ 논문접수일 : 08년 11월 19일
 ◎ 심사의뢰일 : 08년 11월 24일
 ◎ 심사완료일 : 09년 1월 28일