



다중회귀분석을 이용한 국내 대표 아스팔트 혼합물의 소성변형 평가모형

Permanent Deformation Model of Hot Mix Asphalt using Regression Analysis

이관호* 현성철** 조재윤*** 이병식****
 Lee, Kwan Ho Hyun, Seong Cheol Cho, Jae Yoon Lee, Byung Sik

1. 서론

현재 공용중인 아스팔트 포장의 수명은 교통량과 중차량의 증가로 인하여 설계수명에 크게 못 미치고 있다. 다양한 파손 중에서 아스팔트 층에서의 소성변형 발생 빈도가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 측정하기 위하여 여러 가지 시험이 사용되고 있으며, 대표적인 시험에는 일축 및 삼축(Uniaxial and Triaxial Compressive Creep Test), 일축 및 삼축 압축 반복재하시험(Uniaxial and Triaxial Compressive Repeated Loading Test), 전단시험(Simple Shear Test) 그리고 휠트래킹시험(Wheel Tracking Test) 등이 있다.

본 연구에서는 국내에서 많이 사용되고 있는 PG 58-22, PG 64-22, PG 76-22 바인더를 사용하여 총 5종류(표층용 13mm, 19mm 아스팔트 혼합물, 기층용 25mm 아스팔트 혼합물, SMA 13mm 아스팔트 혼합물, SBS 13mm 아스팔트 혼합물)의 일반 밀입도 아스팔트 혼합물 및 개질 아스팔트 혼합물을 2개의 다른 공극률(6%, 10%)로 제작하였고 시험은 30℃, 45℃, 60℃ 온도에서 삼축압축 반복재하시험을 수행하였다. 이를 이용하여 소성변형에 영향을 미치는 인자를 규명하고 소성변형 예측모델을 개발하고자 하였다. 또한 기존의 마샬 배합설계 대신 SUPERPAVE 배합설계법으로 시편을 제작하였다.

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.

2. 아스팔트 혼합물 배합설계 및 분석

2.1 실험재료특성

본 연구에 사용된 아스팔트 혼합물 종류는 밀입도 표층용 13mm 및 19mm, 기층용 25mm, SMA 13mm, 개질아스팔트 혼합물 13mm 등이다. 실험에 이용된 골재는 우리나라에서 보편적으로 이용하는 화강암골재를 이용하였고, 각각의 혼합물별로 사용된 골재의 입도는 수퍼페이브 배합설계 기준에 따랐으며, 사용된 아스팔트 바인더는 국내에서 보편적으로 이용되는 AP-3와 AP-5를 이용하였다.

* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 부교수 · 공학박사
 ** 학생회원 · 공주대학교 건설환경공학부 석사과정
 *** 정회원 · 동의공업 토목과 교수
 **** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사



2.2 아스팔트 혼합물의 배합설계

〈표 1〉은 각각의 아스팔트 혼합물의 배합설계시 얻어진 자료를 정리한 것이다. 각각의 아스팔트 혼합물의 최적아스팔트 함량, N_{ini} , N_{des} , 및 N_{max} 에서의 % G_{mm} , VMA 및 VFA를 나타내고 있다. 측정된 모든 값은 슈퍼패브 배합설계 기준을 만족시키는 것으로 나타났다.

〈표 1〉 배합설계자료를 이용한 아스팔트 혼합물의 배합특성

혼합물 종류			AC Cont.	Gmm	% G_{mm} at N_{ini}	% G_{mm} at N_{des}	% G_{mm} at N_{max}	% Air Voids	% VMA	% VFA
혼합물	입경	바인더								
표층용	13mm	AP-3	5.2	2.482	88.2	96.0	97.1	4.0	15.4	74.0
		AP-5	5.3	2.478	89.4	96.0	97.2	4.0	15.8	75.1
표층용	19mm	AP-3	5.1	2.495	85.9	96.0	97.5	4.0	15.1	73.5
		AP-5	5.1	2.492	86.3	96.0	97.3	4.0	15.5	74.6
기층용	25mm	AP-3	4.3	2.501	87.6	96.0	96.9	4.0	13.6	70.6
		AP-5	4.5	2.507	88.2	96.0	97.0	4.0	13.9	71.1
SMA	13mm	AP-3	5.7	2.510	82.6	96.0	97.7	4.0	16.9	76.3
		AP-5	5.7	2.512	83.3	96.0	97.7	4.0	16.3	75.5
SBS	13mm	PG76-22	4.6	2.483	-	-	-	-	-	-

3. 삼축압축실험을 이용한 결과분석

시험 결과 20000회 까지 다짐이 진행되어도 전단파괴에 의해 발생하는 3단계(Tertiary) 구간은 발생하지 않았으며 압밀화에 의한 변형을 그래프로 확인할 수 있었다. 이는 삼축압축 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 1〉의 그래프와 같다. 그래프에서 나타나는 값들의 크기는 다음과 같다.

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

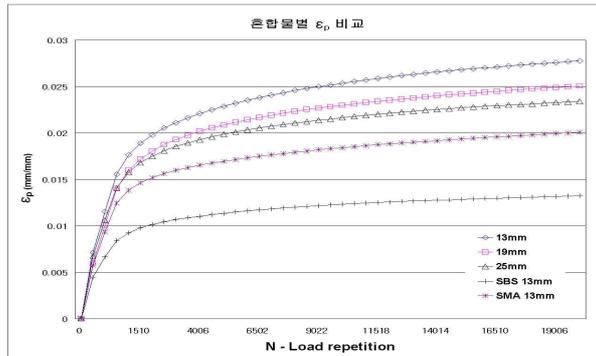
이러한 순서는 개질 아스팔트 혼합물이 일반 밀입도 아스팔트 혼합물에 비해 소성변형에 강하며 사용 골재의 입도가 클수록 소성변형에 강함을 알 수 있다.

4. 소성변형곡선 2단계 구간을 이용한 변형률과 하중재하횟수 상관관계

소성변형 모형의 2단계(Secondary) 구간은 압밀화에 의해 변형이 일어난다. 2단계 구간에서의 누적된 소성 변형률과



하중의 재하횟수 관계는 $p = aN^b$ 식으로 나타낼 수 있다. 여기서, p 는 누적소성변형률, N 은 하중재하횟수, a 는 전대수상의 직선의 절편($N=1$), b 는 전대수상의 직선의 기울기를 의미한다. 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.



〈그림 1〉 혼합물별 ε P 비교

소성변형 모형의 2단계(Secondary) 구간을 구하는 방법에는 그 시작점 A가 1단계 구간에서 De가 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 $p = aN^b$ 의 인자인 a , b 를 구하였다.

〈표 2〉 아스팔트 혼합물의 소성변형인자 a 및 b 평가

혼합물 종류		공극률	a			b		
골재입도	바인더		30℃	45℃	60℃	30℃	45℃	60℃
밀입도 13mm	PG 58-22	6%	0.0051	0.0062	0.0047	0.0687	0.1101	0.1949
		10%	0.0056	0.0154	0.0148	0.1114	0.0866	0.997
	PG 64-22	6%	0.0057	0.0068	0.0069	0.079	0.0894	0.1316
		10%	0.0106	0.0048	0.0192	0.0859	0.1969	0.1078
밀입도 19mm	PG 58-22	6%	0.0052	0.0056	0.0073	0.049	0.0885	0.1225
		10%	0.0044	0.0101	0.0155	0.1106	0.1176	0.1284
	PG 64-22	6%	0.0057	0.0047	0.0076	0.0584	0.1288	0.1337
		10%	0.0066	0.0101	0.0123	0.0702	0.1175	0.1463
밀입도 25mm	PG 58-22	6%	0.0043	0.0054	0.0076	0.0913	0.1006	0.1247
		10%	0.0057	0.0092	0.0156	0.1232	0.1211	0.1066
	PG 64-22	6%	0.0066	0.0057	0.0079	0.0474	0.1032	0.1024
		10%	0.0057	0.0082	0.017	0.1096	0.126	0.0891
SMA 13mm	PG 58-22	6%	0.0039	0.0075	0.0056	0.0831	0.0803	0.1299
		10%	0.0055	0.0094	0.0067	0.1075	0.0966	0.1688
	PG 64-22	6%	0.0058	0.0076	0.0078	0.0591	0.083	0.1111
		10%	0.0028	0.0029	0.0093	0.1512	0.1964	0.1346
SBS 13mm	PG 76-22	6%	0.0032	0.0036	0.0068	0.0628	0.0897	0.0800
		10%	0.0042	0.0039	0.0078	0.1034	0.1311	0.1134



<표 2>는 각 혼합물의 2단계(Secondary)구간에서 누적된 소성 변형률과 하중의 재하횟수 기본 관계식의 중요변수 a , b 를 나타낸 표이다. 두 값 모두 전반적으로 온도와 공극률이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 a 값은 <그림 1>의 혼합물별 ϵ_p 을 비교한 값과 유사한 경향을 보인다. 하지만 부분적으로 경향에 맞지 않는 다른 값들이 섞여있어 소성변형 특성을 정확히 파악하기에는 어려우며 더 많은 시험자료가 필요하겠다.

4. 다중회귀분석을 이용한 소성변형 예측모형

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 2이상인 경우에는 다중회귀모형(multiple regression model)이라고 한다.

분석대상이 되는 자료는 n 개의 관찰개체들로부터 얻은 종속(또는 반응)변수 y 와 $p(\geq 2)$ 개의 독립(또는 설명)변수 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_p$ 에 대한 관찰값으로 구성된다. 여기서 변수 y 와 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_p$ 와의 관계는 다음과 같은 선형모형,

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

으로 규정된다. 단 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 는 편회귀계수(또는 간단히 회귀계수)라 부르는 상수이며, i 번째 관찰개체에 대한 오차항 u_i 는 확률변량이다. 구체적으로 y_i 는 근사적으로 x_i 들의 선형함수이고 u_i 는 그 근사에서의 차이를 측정하며, 특히 u_i 는 어떤 형식의 체계적인 정보도 포함되어 있지 않은 서로 독립적인 정규확률 변량으로 모평균 0과 모분산 σ^2 을 가진다고 가정한다. 또한 회귀계수 β_j 가 가지는 의미는 x_j 를 제외한 나머지 모든 독립들을 고정시킨 상태에서, x_j 의 1단위 증가에 따른 y 의 증분으로 해석할 수 있다. 회귀계수는 최소제곱법을 적요해서 회귀계수들에 대한 추정량을 구할 수 있다. 본 연구에서는 통계 패키지 프로그램인 SPSS를 사용하여 다중회귀분석을 실시하였다

AASHTO 2002 설계법에서는 아스팔트 재료의 소성변형을 예측하기 위하여 다음과 같은 소성변형 예측식을 사용하였다(El-Basyouny et al, 2005).

$$\frac{a-p}{r} = 10^{-3.15552} N^{0.39937} T^{1.734}$$

아스팔트 혼합물의 소성변형시험을 하중재하 횟수(N), 시험온도(T), 시편의 공극률(AV)의 변수로 회귀분석하여 소성변형률/회복변형률(ϵ_p/ϵ_r)의 모델로 나타내었다. 예측식은 다중회귀분석 식을 기본꼴로 하여 소성변형률/회복변형률(ϵ_p/ϵ_r)의 값을 상수항, N, T, AV 의 지수 형태로 나타내었다. 그래프의 x 축에 사용된 측정값 (ϵ_p/ϵ_r)은 실제 시험에서 측정된 Data이며, y 축에 사용된 예측값 (ϵ_p/ϵ_r)은 회귀분석을 이용한 예측모델의 결과로 해석한 예측값이다.

<표 3>은 제시한 소성변형 예측모델의 회귀분석 통계량을 보여준다. 모든 예측모델의 유의확률(P-Value)이 0.05이하로 유의함을 보여준다. 표준화 계수는 지정된 매개변수 이외의 모든 매개변수가 변하지 않고 지정된 매개변수가 한 단위만 변할 때 종속변수가 변하는 정도를 나타낸 것이다. 예측모델의 표준화 계수는 전반적으로 공극률이 재하횟수보다 크며 시험온도는 음(-)의 값을 보인다. 이는 소성변형률/회복변형률(ϵ_p/ϵ_r) 값과 시험온도가 음(-)의 상관계수를 가지기 때문으로 판단된다. <그림 2>는 소성변형 예측모델의 예측값과 시험측정값의 상관관계를 알아보기 위한 산점도이다. 예측모델의 상관계수(r)는 0.893 ~ 0.953의 값을 가지며 이를 통하여 모델의 예측값과 실제 시험값이 매우 근사함을 알 수 있다. 높은 상관계수는 제안한 소성변형 예측모델이 실제 소성변형에 대한 예측에 사용할 수 있음을 보여준다.

5가지 혼합물의 Data를 종합하여 회귀분석을 이용한 소성변형 예측모델을 제시하였으며 아래의 식에 나타내었다. 하중재하 횟수(N), 시험온도(T), 시편의 공극률(AV)을 변수로 사용하였으며 <표 3>에서 각 항이 식에 유의함을 확인하

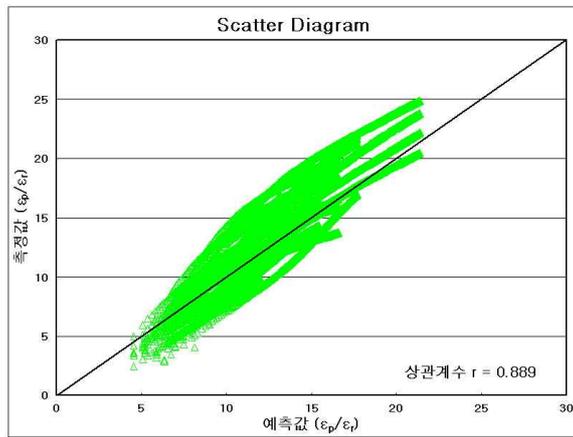


였다. 예측모델의 신뢰도를 확인하기 위하여 예측값과 측정값의 산점도를 <그림 2>과 같이 나타내었으며 상관계수(r) = 0.889를 확인하였다. 각각의 혼합물별 상관계수보다는 작은 값을 가지지만 전체 혼합물을 전반적으로 평가하기에는 충분하다 판단된다.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = 10^{0.9140} N^{0.1416} T^{-0.4659} AV^{0.4953}$$

<표 3> 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 2> 회귀분석을 이용한 산점도

5. 결론

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

- 본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 소성변형 시험의 결과를 이용하여 다중회귀분석을 사용한 소성변형 예측모델을 제안하였다. 아스팔트 혼합물은 PG 58-22, PG 64-22, PG 76-22의 3가지 종류와 화강암 골재를 사용하여 표층재료인 밀입도 13mm, 19mm와 기층용 밀입도 25mm 그리고 SMA 13mm, SBS 13mm 개질아스팔트 혼합물을 제작하였다. 준비된 5종의 아스팔트 혼합물을 공극률(AV), 온도(T) 하중재하횟수(N)에 따른 소성변형특성을 파악하였다.
- 삼축압축 반복재하시험법을 사용하여 소성변형 시험을 실시한 결과 같은 공극률 조건에서 아스팔트 혼합물은 온도가 증가할수록 소성변형이 증가하였으며, 같은 온도조건에서는 공극률이 높을수록 혼합물의 소성변형이 증가



하였다. 제안한 예측모델을 측정값과 비교한 결과 높은 상관계수(r)를 확인할 수 있었고 이것은 예측모델이 높은 신뢰도를 가짐을 나타낸다.

- 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 소성 변형 파손모형을 검증하면 현장에 적용이 가능한 수정된 예측모형을 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 국토해양부 한국형포장설계법 개발 및 성능개선연구 지원사업의 지원을 받아 이루어졌고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박희문, 최지영, 박성환, (2005), "19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 소성변형 예측 모델 개발," 한국도로학회 논문집
2. 박태성, 이관호, (2007), "삼축 압축 반복하중 재하시험에 의한 아스팔트 혼합물의 소성변형 예측모델 개발", 경성대학교 대학원 석사학위 논문
3. 허정도, 추상혁, 최한길, (2003), "소성변형으로 인한 아스팔트 혼합물의 파괴거동", 한국도로학회 논문집.
5. 서혜선, (2003), "SPSS를 활용한 회귀분석", SPSS아카데미
6. Bjorn 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.
6. Fujie Zhou, Tom Scullion and Lijun Sun, (2004), "Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes", Journal of Transportation Engineering, Vol. 130 No. -494
7. Hussain U. Bahia and Timothy P. Fiemel, (1998), "Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor", 1998 AAPT, pp. 189-213
8. Kamil E. Kaloush and Matthew W. Witczak, (2002), "Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixture", 2002 Annual Transportation Research Board Meeting
9. Samuel H. Carpenter and William R. Vavrik, (2001), "Repeated Triaxial Testing During Mix Design For Performance Characterization", 2001 Annual Transportation Research Board Meeting