



19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 소성변형 예측 모델 개발

Development of the Permanent Deformation Prediction Model of 19mm Dense Grade Asphalt Mixtures

박 희 문* 최 지 영** 박 성 완***
 Park, Hee Mun Choi, Ji Young Park, Seong Wan

Abstract

Permanent Deformation is one of the most important load-related pavement distresses in asphalt pavements. The Korean Pavement Design Guide currently being developed adopted the mechanistic-empirical approach and needed the pavement distress prediction models. This study intends to develop the model for prediction of permanent deformation in the asphalt layer and estimate the pavement performance.

The objectives of this paper are to figure out the factors affecting the permanent deformation and then develop the permanent deformation prediction model for asphalt mixtures. The repeated triaxial load test was performed on the 19mm dense graded asphalt mixture with variation of temperature and air void. Results from the laboratory tests showed that temperature and air void in asphalt mixtures have significantly influenced on the factors in prediction model. The permanent deformation prediction model for 19mm dense grade asphalt mixtures has been developed using the multiple regression approach and validated the proposed permanent deformation prediction model.

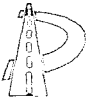
Keywords : permanent deformation, multiple regression, permanent deformation prediction model

요 지

아스팔트 포장에서 소성변형은 교통하중에 의해 발생하는 가장 심각한 파손중의 하나이다. 현재 개발중인 한국형 포장 설계법은 역학적-경험적 설계법으로 다양한 포장 파손 예측모델을 필요로 한다. 이 연구는 포장설계시 아스팔트층에서 발생하는 소성변형량을 예측할 수 있는 모델을 개발하여 포장의 공용성을 규명하고자 하였다. 본 논문은 아스팔트 혼합물의 소성변형에 영향을 미치는 인자를 규명하고, 소성변형 예측 모델을 개발하고자 한다. 이를 위하여 3단계 온도, 공극률을 조합한 19mm 밀입도 혼합물에 대하여 삼축압축 반복재하시험을 수행하였다. 그 결과 혼합물의 온도와 공극률이 소성변형 예측 모델 계수에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이에 근거하여 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물에 대한 소성변형 예측식을 다중회귀분석을 통하여 개발하였으며, 개발된 모델을 검증하였다.

핵심용어 : 소성변형, 다중회귀분석, 소성변형 예측 모델

* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사
 ** 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학석사
 *** 정희원 · 단국대학교 토목공학과 · 공학박사



1. 서론

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

본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 소성변형에 영향을 미치는 인자를 규명하고, 소성변형 예측 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 3단계 온도 및 공극률을 조합한 19mm 밀입도 혼합물에 대하여 삼축압축 반복재하시험을 수행하였다.

2. 소성변형모델

소성변형은 아스팔트 혼합물의 압밀화(densification)와 전단변형(shear deformation)에 의해서 주로 발생한다. 그림 1은 삼축압축 반복재하

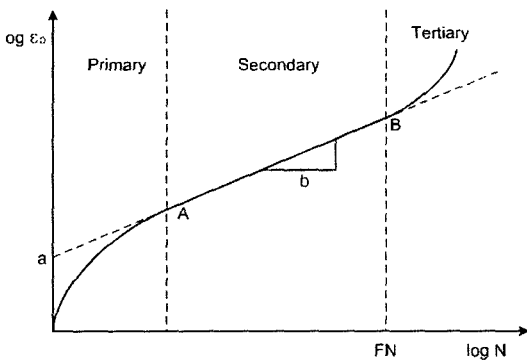


그림 1. 소성변형률과 하중재하횟수의 전형적 관계

시험의 전형적인 결과로서 소성변형률과 하중재하횟수의 관계를 나타낸 것이다. Secondary구간까지는 압밀화에 의한 변형이, Tertiary구간부터는 전단에 의한 변형이 지배적으로 발생한다. 또한, Tertiary구간이 시작되는 B점을 흐름점이라 정의하고, 이때의 하중재하횟수를 흐름값(Flow Number, FN)이라고 한다.

현재까지 아스팔트 혼합물의 소성변형률과 하중재하횟수의 관계를 나타내는 모델이 많이 개발되었다. 그중에도 소성변형률과 하중재하횟수 관계를 log-log로 나타낸 다음과 같은 모델이 가장 널리 사용되고 있다.

$$\epsilon_p = aN^b \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

여기서, ϵ_p = 누적소성변형률

N = 하중재하횟수

a = 전대수상의 직선의 절편($N=1$)

b = 전대수상의 직선의 기울기

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 하중재하 횟수가 1일 때의 소성변형률을 의미하며, 상수 b 는 하중재하횟수에 따른 소성변형률의 변화율을 의미한다.

누적된 소성변형률을 하중재하횟수로 미분하여 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \epsilon_p}{\partial N} = \epsilon_{pn} = \frac{\partial (aN^b)}{\partial N} \quad \text{또는, } \epsilon_{pn} = abN^{(b-1)} \quad \langle \text{식 2} \rangle$$

회복변형률(ϵ_r)은 하중재하횟수의 영향을 받지 않는다고 가정하면, 양변을 회복변형률(ϵ_r)로 나누어 회복변형률에 대한 소성변형률의 비는 <식 3>과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{\epsilon_{pn}}{\epsilon_r} = \frac{ab}{\epsilon_r} N^{(b-1)} \quad \langle \text{식 3} \rangle$$



$\mu = \frac{ab}{\epsilon_r}$, $\alpha = 1 - b$ 를 대입하면 <식 3>을 <식 4>와 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\frac{\epsilon_{pn}}{\epsilon_r} = \mu N^{-\alpha} \quad \langle \text{식 4} \rangle$$

위 식에서 ϵ_{pn} 은 N번째 하중재하시 발생하는 소성변형률을 의미하며, μ 는 소성변형 계수로서, 소성변형률과 탄성변형률 사이의 비례상수를 의미하고, α 는 하중재하횟수가 증가함에 따른 소성변형 증가량의 감소율을 의미한다. <식 4>의 모델은 VESYS 포장 설계 및 분석 절차(Kenis, 1977)에서 이용되었고, 또한 다양한 포장재료의 공용성 예측 모델로 널리 사용되고 있다. 여기서는 하중재하수에 따른 소성변형이 급속도로 발생하는 Tertiary 구간에서는 적용할 수 없고, Primary와 Secondary 구간에서만 재료의 소성변형을 정의할 수 있다. 이러한 소성변형 계수는 온도, 하중, 그리고 공극률에 대한 함수로 나타낼 수 있으며, 모든 조건에서 시험이 수행되면 최종적으로 소성변형모델이 개발되어 <식 1>과 <식 4>는 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_p = a(T, \sigma, AV) N^{b(T, \sigma, AV)} \quad \langle \text{식 5} \rangle$$

$$\frac{\epsilon_{pn}}{\epsilon_r} = \mu(T, \sigma, AV) N^{-\alpha(T, \sigma, AV)} \quad \langle \text{식 6} \rangle$$

여기서, T = 온도(°C)
 σ = 재하응력
 AV = 공극률(%)

그림 2는 하중재하에 따른 변형의 일반적인 형태를 나타낸 것이다. 하중주기마다 하중재하 후 휴지기 동안 회복변형이 일어나는데, 이때 회복되지 않는 부분이 소성변형이다. 회복변형과 소성변형을 단위길이(시편의 길이)로 나누어준 것이 회복변형률과 소성변형률이다.

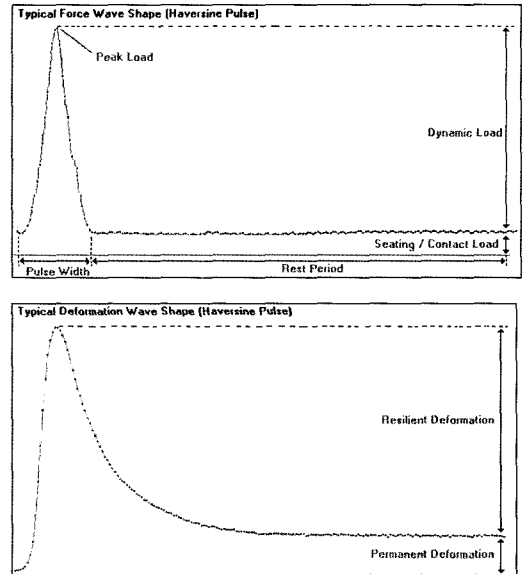


그림 2. 하중재하와 변형의 일반적인 형태

3. 소성변형 시험

3.1 시험설계

아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 파악하기 위하여 NCHRP 보고서 465호 “Simple Performance Test for Superpave Mix Design”에서 제시하는 삼축압축 반복재하시험(Triaxial Compressive Repeated Loading Test)을 채택하였다.

아스팔트 혼합물의 소성변형에 영향을 미치는 요인으로는 크게 아스팔트 혼합물의 골재의 입도 및 품질, 아스팔트 바인더의 종류, 배합설계 방법상의 문제, 혼합물의 생산 및 시공시 품질관리상의 문제로

표 1. 소성변형 시험을 위해 고려된 시험변수

변수종류	종류	갯수
골재의 입도	표층용19mm	1
아스팔트 바인더	PG 64-22	1
공극률 (%)	4%, 6%, 8%	3
시험온도(°C)	30°C, 45°C, 60°C	3
하중재하크기	689kPa	1



나낼 수 있다. 이 연구에서는 아스팔트 혼합물의 온도와 공극률이 소성변형에 미치는 영향에 대하여 조사하고, 소성변형 예측 모델을 개발하고자 한다. 본 연구에서는 국내에서 일반적으로 사용되는 표층재료인 밀입도 19mm의 골재에 PG 64-22 바인더를 사용하였다. 구체적인 시험변수에 대한 계획은 표 1에서 정리하였다.

3.2 배합설계 및 시편제작

혼합물에 사용된 골재는 국내에서 가장 많이 이용되는 화강암 종류를 사용하였으며, 아스팔트 혼합물의 배합설계는 슈퍼페이브 Level 1 방식에 의해 수행되었다. 목표공극률을 6%로 하여 4%와 8%의 시편을 제작하여 시험하였다.

소성변형 시험용 시편은 직경 150mm, 높이 170mm의 원통형 시편을 선회다짐기로 제작한 다음 직경 100mm의 시편을 코어채취기로 채취하고, 시편상부 및 하부를 10mm씩 절단하여 높이 150mm의 시편을 제작하였다.

시편을 코어 및 절단한 후 시편내부의 수분을 제거하기 위하여, 25℃의 챔버에 방습제인 실리카겔(silica gel)을 함께 넣어 3일간 건조시켰다. 이렇게 건조시킨 시편은 공기와의 접촉을 차단하기 위하여 랩으로 감싼 후 서늘한 곳에서 보관하였다.

3.3 시험방법

시험에 사용된 장비는 Servo-Hydraulic Closed Loop 시스템 장비로서 IPC사의 UTM-25이며, 추가로 온도조절용 챔버와 유압장비를 조정하고 데이터를 수집하기 위한 CDAS(Control and Data Acquisition System)으로 구성되어 있다.

구속압을 재하하기 위하여 IPC사의 RaTT셀(Rapid Triaxial Testing System)이 사용되었다. RaTT셀은 시편의 주변을 멤브레인으로 감싼 후 공기압으로 구속압을 가하는 장치로서, 간편하게 삼축

응력상태를 모사할 수 있는 장점이 있다.

시편의 온도를 맞추기 위하여 챔버안에 시편의 중앙에 온도센서를 장착한 더미 시편을 두어 시험온도와 더미시편의 온도를 체크한 후 시험에 임하였으며, 그 시간은 대략 2시간 이상이 되었다.

현장에서 발생하는 교통하중을 유사하게 모사하기 위하여 재하하중은 0.1초의 재하기와 0.9초의 휴지기를 갖는 Haversine파를 재하하였다. 하중조건에서 구속응력을 138kPa(20psi)로 고정하였으며, 축하중은 689kPa(100psi)로 시험하였다. Witzack and Kaloush(2002)은 "Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures"에서 구속압을 138kPa(20psi)로 고정하고, 축하중을 827kPa(120psi), 758kPa(110psi), 689kPa(100psi)로 바꿔가면서 시험을 수행하였다.

4. 시험결과 분석

밀입도 19mm+PG 64-22 혼합물의 공극률이 4%, 6%, 8%인 시편을 30℃, 45℃, 60℃ 온도에서 구속응력 138kPa, 축하중 689kPa에서 시험을 실시하였다. 그림 3~그림 5는 주어진 아스팔트 혼합물의 공극률과 온도하에서 하중재하횟수에 따른 소성변형율의 변화를 보여주고 있다. 같은 공극률 조건에서 시험온도가 올라갈수록 소성변형률이 증가하였으며, 같은 온도조건에서도 공극률이 높을수록 혼합물의 소성변형률이 증가함을 알 수 있다. 온도의 증가에 따른 소성변형율의 변화는 모든 공극률에서 비선형적으로 증가함을 관찰할 수 있었다. 모든 시험에서 전단에 의한 소성변형이 발생하지 않았고, 아스팔트 혼합물의 압밀에 의한 변형만 관찰할 수 있었다. 하중재하수와 소성변형율의 관계를 회귀분석을 한 후에 각 온도와 공극률에서 <식 1>의 계수값 a 와 b 를 결정할 수 있다. 그림 6~그림 8은 각 온도와 공극률 조건하에 회복변형률을 나타내고 있다. 여기에서 회복변형률은 온도와 공극률과 관계없이 하중재



하횡수가 약 500회 이후부터 안정화되는 경향을 보였다. 그러한 이유로 <식 4>의 소성변형인자인 μ 값을 계산 시 하중재하횡수가 2000~6000회 사이의 회복변형을 평균값을 사용하였다. 회복변형률의 노이즈를 제거하기 위하여 분포도의 상하 5%를 제거하였으나 그 차이는 $10 \mu\epsilon$ 이내로 매우 작았다. 회복

변형률은 전반적으로 시험온도가 상승할수록 비례하게 증가하였으며, 같은 온도에서는 공극률이 클수록 크게 나타났다.

그림 9~그림 12는 공극률과 온도에 따른 a , b , μ , α 값의 변화를 나타내고 있다. 그림 9에 따르면 a 값은 온도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가함을

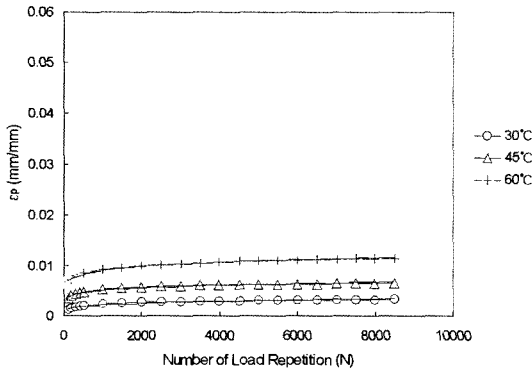


그림 3. 하중재하수에 따른 소성변형률 변화 (공극률 4%)

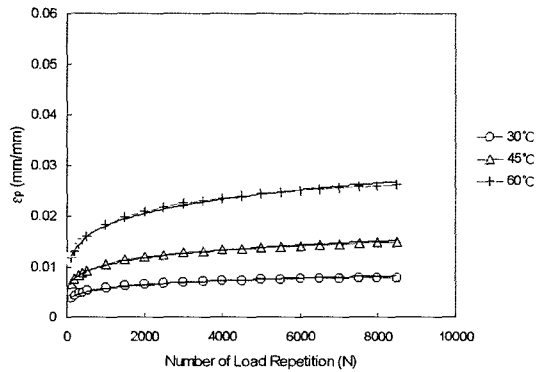


그림 4. 하중재하수에 따른 소성변형률 변화 (공극률 6%)

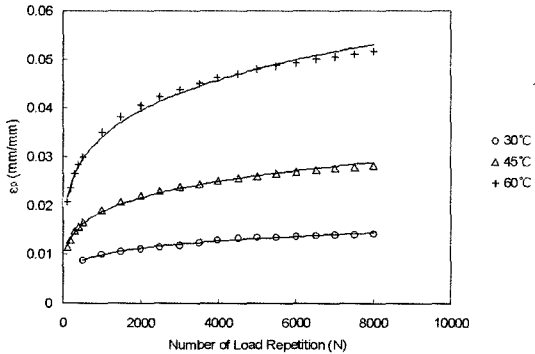


그림 5. 하중재하수에 따른 소성변형률 변화 (공극률 8%)

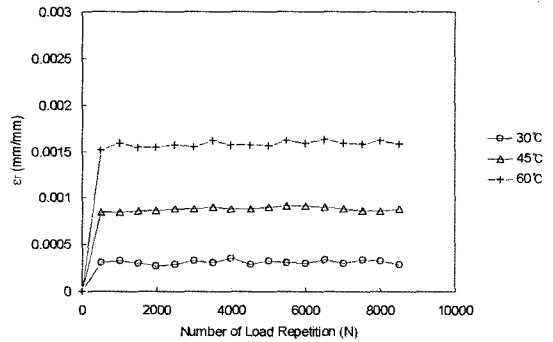


그림 6. 하중재하수에 따른 회복변형률 변화 (공극률 4%)

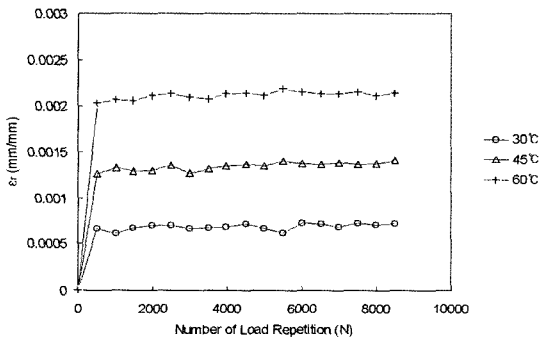


그림 7. 하중재하수에 따른 회복변형률 변화 (공극률 6%)

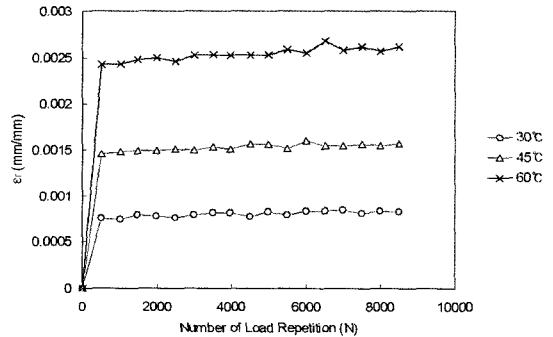


그림 8. 하중재하수에 따른 회복변형률 변화 (공극률 8%)

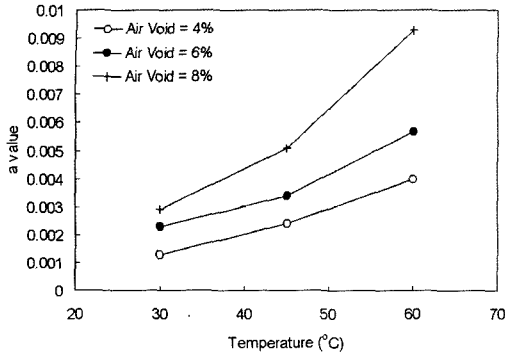
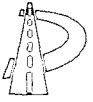


그림 9. 온도와 공극률이 a값에 미치는 영향

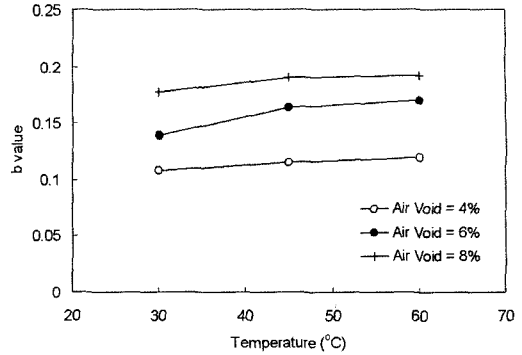


그림 10. 온도와 공극률이 b값에 미치는 영향

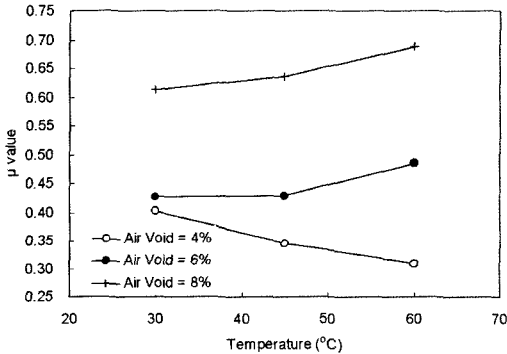


그림 11. 온도와 공극률이 μ값에 미치는 영향

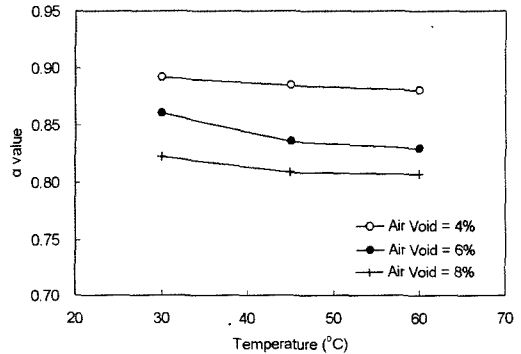


그림 12. 온도와 공극률이 α 값에 미치는 영향

알 수 있고, 공극률이 증가함에 따라 비선형성이 높아지고 있다. 그림 10에서 보는 바와 같이, a 값과 동일하게 b 값 또한 온도가 증가함에 따라 증가하나 그 차이는 작아짐을 알 수 있다. 또한 공극률 4%의 경우에는 온도에 따른 기울기의 변화가 거의 없었다. 공극률이 4%일 경우에는 온도가 증가하여도 소성변형률의 변화율이 증가하지 않았다. 이는 4% 공극률 혼합물의 경우 더 이상의 압밀화에 의한 소성변형을 기대할 수 없는 상태로 판단된다.

그림 11은 공극률과 온도에 따른 μ값의 변화를 나타내고 있다. 공극률 6%, 8%의 경우에는 온도와 공극률의 증가에 따라 μ값이 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만, 공극률 4%에서는 30°C, 45°C에서의 회복변형률값(ε_r)이 매우 작아서 30°C에서 μ값이 크게 나왔고, 이로 인하여 온도에 따른 소성변형 특성을 정확히 파악하기 어려웠다.

5. 소성변형 예측 모델 개발

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

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3.15552} N^{0.39937} T^{1.734} \quad \langle \text{식 7} \rangle$$

〈식 7〉과 같이 회복변형률에 대한 소성변형률의 비는 아스팔트층의 온도와 하중재하횟수를 이용하여 예측할 수 있다. AASHTO의 소성변형 예측식은 온도와 하중재하횟수 2개의 변수만을 가지고 있는 반면, 본 연구결과 이러한 인자와 더불어 아스팔트 재료의 공극률 또한 소성변형에 영향을 미치는 인자로 규명되었다. 이상의 시험결과를 토대로 다중회귀분석을 통하여 다음과 같은 소성변형예측 모델을 개발하였다.



$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-1.9161} N^{0.1520} T^{0.2134} A V^{2.4571} \quad (\text{식 8})$$

여기서, ϵ_p = 소성변형률
 ϵ_r = 회복변형률
 T = 온도(°C)
 σ = 재하응력
 AV = 공극률(%)
 $R^2 = 0.991$

(식 8)의 모델은 3개의 시험온도와 3개의 공극률 및 하중재하횟수를 매개변수로 갖는 총 7400여개의 전체 데이터에 대하여, 50%의 데이터를 무작위 추출(Random sampling)을 통하여 모델을 개발하였으며, 나머지 50%의 데이터를 통하여 개발된 모델에 대한 검증 실시하였다. 본 분석을 위하여 통계 패키지인 SPSS를 사용하였으며, 모델의 편의(Bias)를 줄이기 위하여 모수의 추정값들은 무작위 추출을 10회 반복하여 산술평균값을 취하였다. 다중회귀분석을 통하여 도출된 모수의 추정값 및 그에 따른 t-값과 유의확률(P-value)은 표 2와 같으며 수정된 R^2 은 0.991로 다중회귀분석을 통한 소성변형예측모델의 설명력이 높음을 알 수 있다.

표 2. 회귀분석 통계량

	표준오차	표준화계수	t-값	유의확률(P-value)
상 수	0.008002	-	-239.12	< 0.0001
하중재하횟수	0.001087	0.2101	139.67	< 0.0001
시험온도(°C)	0.003824	0.0830	55.16	< 0.0001
공극률 (%)	0.003809	0.9713	645.81	< 0.0001

표 2의 표준화계수는 지정된 매개변수 이외의 모든 매개변수가 변하지 않고 지정된 매개변수가 한 단위 변할 때 종속변수가 변하는 정도를 나타낸 것으로, 공극률의 표준화계수가 0.9713으로 하중재하횟수(0.2101)와 시험온도(0.0830)에 비하여 4.6배 및 11.7배 영향력이 큰 것으로 나타났다.

또한 개발된 모델의 검증에 위하여 10회 반복에서 모델개발에 사용되지 않은 50%의 데이터를 통하여

모델의 검증을 실시하였으며, 아래의 그림 13은 10회 반복 중 한 번의 결과이며, 실제 실험값과 개발된 모델로부터 도출된 예측값과의 산점도를 나타내며, 실험값과 예측값 사이의 상관계수 $\rho=0.994$ 를 통하여 개발된 모델로부터 예측값이 실제 실험값과 아주 근사함을 나타내고 있다. 결론적으로 본 논문에서 개발된 소성변형예측모델을 통하여 아스팔트의 소성변형에 영향을 미치는 인자들의 영향력을 규명하였으며, 그에 따른 소성변형에 대한 예측을 가능하게 할 수 있게 되었다.

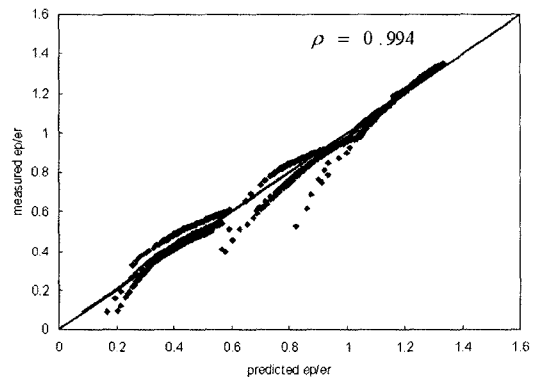


그림 13. 예측값과 실험값의 비교

본 논문에서 개발된 모델은 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물에 대해서만 적용이 가능하며, 향후에 다양한 입도와 바인더 종류에 따른 아스팔트 혼합물의 소성변형 예측 모델을 개발할 예정이다.

6. 결론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 삼축압축 반복재하시험을 통하여 하중재하횟수, 온도, 공극률이 소성변형에 미치는 영향을 파악하였다.
- 아스팔트 혼합물의 소성변형은 같은 공극률 조건에서 아스팔트 혼합물의 온도가 증가할수록 소성변형량이 증가하였으며, 같은 온도조건에서도 공극률이 높을수록 혼합물의 소성변형량이 증가하



였다.

- 아스팔트 혼합물의 소성변형은 하중재하수와 온도의 영향보다 공극률의 영향이 11.7배 더 큰 것으로 나타났다.
- 본 연구에서는 삼축압축 반복재하시험 결과를 토대로 하여 19mm 밀입도 아스팔트 혼합물에 대한 소성변형 예측식을 개발 및 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 수탁과제인 "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구"의 일부 성과물로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 이현중, (1999) "개질아스팔트 혼합물의 소성변형 특성연구", 강릉대학교 공학연구소 논문집, Vol. 7, No. 1, pp.79-87.
2. 허명희, (2002) "SPSS를 활용한 통계적 방법론", (주)데이터 솔루션.

3. 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. 4, 2004, pp. 486-494
4. Kamil E. Kaloush and Matthew W. Witzcak, (2002) "Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures", *2002 Annual Transportation Research Board Meeting*.
5. M. W. Witzcak and K. Kaloush, etc., (2002) "Simple Performance Test for Superpave Mix Design", *NCHRP Report 465*.
6. Xicheng Qi and M. W. Witzcak, (1998) "Time-Dependent Permanent Deformation Models for Asphalt Mixtures", *Transportation Research Board*.
7. M. M. El-Basyouny, M. W. Witzcak and K. Kaloush, (2005) "Development of the Permanent Deformation Models for the 2002 Design Guide", *Submitted for Presentation in the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.*

〈접수 : 2005. 1. 24〉