JOURNAL of the Korean Asphalt Institute Vol. 13, No. 2, 306-321, 2023
https://doi.org/10.22702/jkai.2023.13.2.25

pISSN: 2234-0785
eISSN: 2635-9553

Scientific Paper

통계분석 기법을 적용한 고점도 아스팔트 바인더의 저온 휨 특성 연구

박건호[1] · 박성현[2]* · 박태순[3] · 문기훈[4]
[1]서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정, [2]서울과학기술대학교 건설시스템공학과 학사과정,
[3]서울과학기술대학교 건설시스템공학과 정교수, [4]한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

A study on Low-Temperature flexural characteristics of high viscosity asphalt binder useing statistical verification techniques

Geon Ho. Park[1], Sung Hyeon. Park[2]*, Tae Soon. Park[3] and Ki Hoon Moon[4]
[1]Master's Student, Seoul National University of Science & Technology, Department of Civil Engineering
[2]Bachelor's Student, Seoul National University of Science & Technology, Department of Civil Engineering
[3]Professor, Seoul National University of Science & Technology, Department of Civil Engineering
[4]Principal Researcher (Ph.D.), Korea Expressway Corporation Pavement Research Division (KECPRD)

***Corresponding author:** Tel. +82-2-970-6946, E-mail. poiiopoostar@naver.com

Received: December 4, 2023; **Revised:** December 21, 2023; **Accepted:** December 22, 2023

ABSTRACT

Porus asphalt pavement, with a 20% porosity compared to conventional asphalt, allows for the generation of high-pressure water infiltration during rainfall. To prevent premature oxidation of the asphalt binder due to exposure to UV rays and wind, high-modulus asphalt binders are utilized. In addition to the standard performance grade test, a flexural beam test is conducted for freeze-thaw vulnerability assessment. Currently, flexural beam test is conducted at -20°C regardless of the performance grade. To evaluate the suitability of this test temperature, mathematical modeling and statistical analysis were performed, confirming the appropriateness of the current flexural beam test temperature of -20°C.

Keywords: Porus asphalt pavement, t-test, Flexural beam test, Mathematical modeling

© 2023 by Korean Asphalt Institute. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

배수성 아스팔트 포장의 특징으로 일반 아스팔트 포장 대비 공극률 20%를 가지고 있어 우천시 공극에 의해 혼합물내 고압 수압작용이 발생 가능하다. 높은 공극률 때문에 자외선과 바람에 투과로 인하여 아스팔트 바인더 내 조기산화가 발생하여, 외부 조건에 저항 할 수 있는 강력한 아스팔트 바인더의 구분이 필요하다. 골재와 아스팔트 바인더간의 결합력 증가 및 내부 피막두께 증가를 위해 고점도 아스팔트 바인더의 개발 및 적용이 필요하다. 배수성 아스팔트 포장에는 공용성 등급 시험 기준 PG 82-22이상의 고점도 아스팔트 바인더를 사용한다. 또한, 공용성 등급 기준 시험외에 결빙 취약구간 시험시 추가적으로 휨 시험을 수행하여야 한다. 1999년 일본도로공단(日本道路公団, Japan highway public corporation, 이하 JH)과 일본 개질아스팔트협회(日本改質アスファルト協会, Japan Modified asphalt association, 이하 JMAA)가 공동연구를 하여 배수성 아스팔트 혼합물 및 한랭지용 포장에 사용되는 고점도 아스팔트 바인더를 평가하기 위해 휨 시험(flexural beam test)을 개발 및 제안하였다(大野滋也 et al., 2002; 村山 雅人 and 濱田 幸二, 2005; 日本改質アスファルト協会技術委員会, 2021). 현재 휨 시험은 2011년 국내에 도입되어 PG등급에 관계 없이 시험 온도 -20°C로 기준이 정립되어있다. 휨 시험 후 나타나는 3가지(파단, 균열, 휨) 형태가 있는데, 이는 동일 PG등급이라도 제조사별로 실험 결과값이 상이하다. 즉, 고점도 아스팔트 바인더의 세부적인 저온 성능 평가를 정량적으로 평가할 수 있는 기존 선행연구사례를 활용하여 수학적 모델링을 실시하여 휨 시험 결과의 수학적 모델링 작업을 통한 전반적 성능 예측 결과를 바탕으로 통계분석을 하여 현재 휨 시험 온도 기준인 -20°C에 대한 시험온도 적정성에 대한 평가를 수행하였다.

2. 문헌고찰

2.1 저온 휨 시험 결과의 수학적 모델을 이용한 연구사례

2022년 강일환은 고점도 아스팔트 바인더의 저온 성능은 동일 PG등급 및 제조사별로 차이가 존재하여 고점도 아스팔트 바인더의 저온 특성을 정확히 파악할 필요가 있어, 다양한 시험 온도 조건별로 저온 성능을 예측할 수 있는 수학적 모델링 및 관련 분석 기법의 개발 필요성을 언급하였다.

휨 시험의 결과인 시간-하중곡선을 최소제곱법(Least Saures Fitting Method)을 이용하여 지수함수에 기반한 수학적 모델링 및 관련 예측식을 개발하고 재료별, PG 등급별, 시험 온도별로 분석을 하였다. 관련 예측식은 아래 식 (1)을 참조하도록 한다.

$$\log N = A \cdot e^{B \cdot t} + C \tag{1}$$

다음 그림(Figs. 1~3)은 식 (1)의 각 독립변수에 대한 물리적 의미를 보여준다.

Fig. 1은 독립변수 A를 ±0.5 증가시킨 결과를 그래프로 도식한 것이다. Parameter A는 기울기 인자(Slope factor)를 뜻하고, 임계 하중까지 도달하는데 소요되는 변화율이다. Parameter A가 증가하면 취성(Brittle)이 증가한다(Kang, 2022).

Fig. 2는 독립변수 B를 ±0.5 증가시킨 결과를 그래프로 도식한 것이다. Parameter B는 초기형상인자(Early shape factor)를 뜻하고, 임계 하중까지 초기 거동의 형태에 영향을 미치는 인자이다. Parameter B가 증가하면 연성(Ductile)이 증가하고 수렴점을 향해 거동이 완만해진다(Kang, 2022).

Fig. 3은 독립변수 C를 ±0.5 증가시킨 결과를 그래프로 도식한 것이다. Parameter C는 초기부하하중(Early applied load)를 뜻하고, Parameter C가 증가하면 초기부하하중 값 또한 증가한다(Kang, 2022).

해당 모델링으로 휨 시험 결과값을 예측한 결과 독립변수 A, B, C의 물성값의 차이가 감소하는 것을 확인하였다. PG 저온 등급이 높은 바인더일수록 저온에서 연성(Ductile)의 특성이 강해서 각각의 다른 값 독립변수별 식 (1) 예측 결과값의 차이가 적은 것으로 판단된다. 고점도 아스팔트 바인더의 저온 성능에 한해 현재 PG등급 기준 외에 분석·평가 방법 및 관련 기준이 제시되어야 할 것이라고 언급하였다(Kang, 2022).

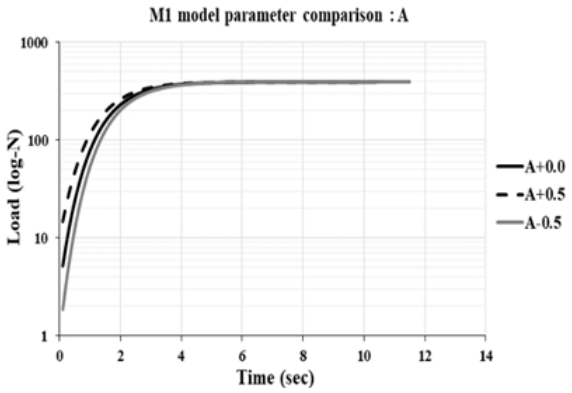


Fig. 1. Parameter A-value

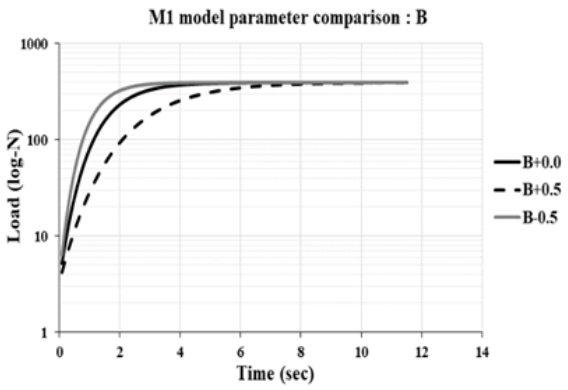


Fig. 2. Parameter B-value

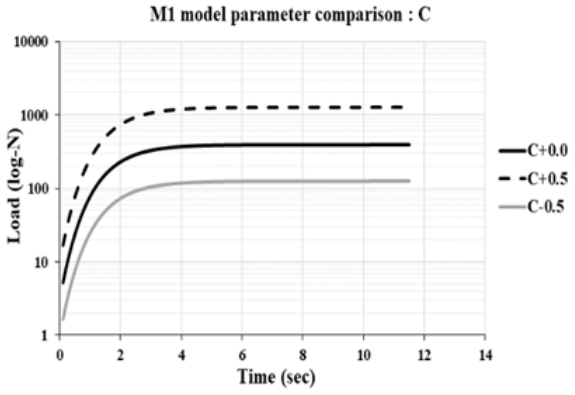


Fig. 3. Parameter C-value

2.2 양측검정 통계법(t-tset)

통계학에서 일반적으로 두 집단의 평균 차이 유무를 정량적으로 검증하는 방법으로 양측검정(일명: t-test) 기법이 자주 사용된다(Cook and Weisberg, 1999; Moon, 2010). t-test 기법은 두 집단(Group A and Group B)의 모수, 평균 및 표준편차 값을 이용하여 각각의 평균 값의 차이에서 유의미성이 존재하는지 아닌지를 평가하는 방법으로 아래의 두 가정이 수반된다.

1. 각각의 집단은 정규분포(Normal distribution)를 따른다.
2. 각각의 집단내 표준편차는 동일한 값을 지닌다.

두 가정을 통해 t-test법은 아래의 두 경우의 수를 지닌다.

1. (귀무 가설) 기본 가정(Null hypothesis) : $\mu_A = \mu_B$ (2)
2. (대체 가설) 대체 가정(Alternative hypothesis) : $\mu_A \neq \mu_B$ (3)

여기서 μ_A, μ_B 는 양측 검정을 실시하는 대상그룹(Group A, B)의 평균값을 의미한다.

이제 대상그룹(Group A, B)의 모수(n) 및 표준편차 값(S)을 바탕으로 통합 표준편차 값(S'=Pooled standard deviation)을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$S' = \sqrt[2]{\frac{(n_A - 1) \cdot S_A^2 + (n_B - 1) \cdot S_B^2}{n_A + n_B - 2}} \tag{4}$$

식 (4)의 통합 표준편차값의 자유도(Dgrees of freedom)은 아래와 같이 계산된다.

$$df = n_A + n_B - 2 \tag{5}$$

식 (4) 및 식 (5)를 통해 아래와 같이 t-score를 계산한다.

$$t - score = \frac{\mu_A - \mu_B}{S' \cdot \sqrt[2]{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}}} \tag{6}$$

식 (6)을 바탕으로 최종적 통계 지표인 p-value(0~1)를 계산한다. 본 논문에서는 유의미한 통계적 수준값을 대부분의 연구에서 적용하는 기준값인 0.05(alpha=5%, 양측검정)로 결정 하였다(Fig. 4 참조).

식 (2)~(6)의 계산값으로 얻어진 p-value값이 0.05보다 큰 경우 귀무 가설이(식 (2)) 채택되어 대상그룹(Group

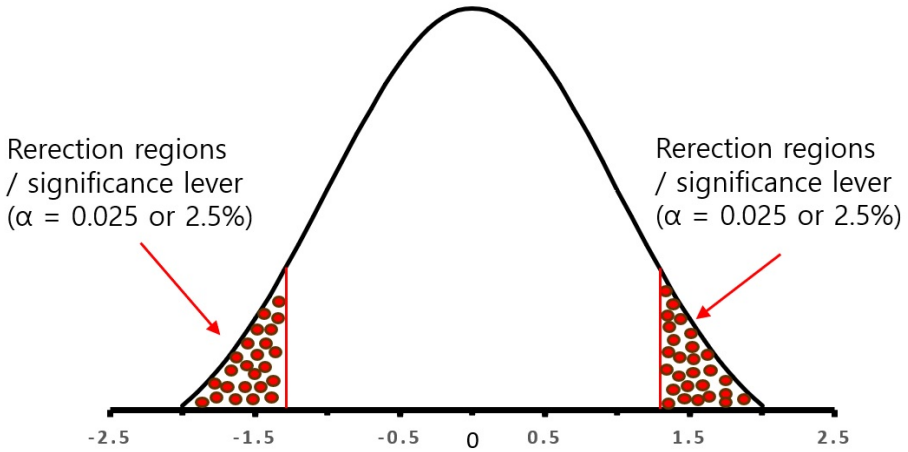


Fig. 4. Normal distribution curve and statistical criteria

A, B)의 평균 값은 통계적으로 동일하다 할 수 있다. 이와 반대로 *p*-valua값이 0.05보다 작은 경우 대체 가설(식 (3))이 채택되며 이는 대상그룹(Group A, B)의 평균 값이 통계적으로 다르다고 할 수 있는 것이다.

식 (2)~(6)을 통해 각각의 시험온도에서 수행한 수학적 모델링 값을 각각의 시험시간 구간별로 양측 검정을 실시하여, 그 시험 결과값의 차이가 통계적으로 유의미한지 여부를 검증하였다.

3. 시편제작 및 휨 시험

3.1 시편제작

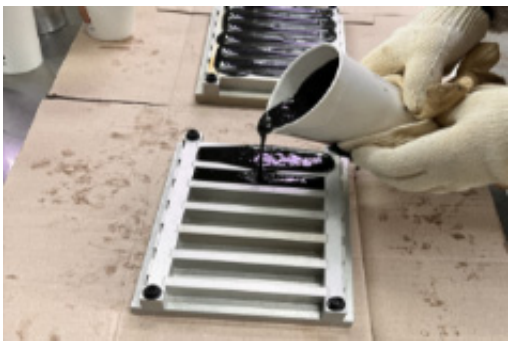
휨 시험 몰드는 시편 6개 제작이 가능하며, 길이 120 mm, 폭 20 mm, 두께 20 mm의 몰드에 S사의 실리콘 구리스를 도포하여 고점도 아스팔트 바인더가 몰드 형틀에 접착이 되지 않게 한다.

1. 사전에 실리콘 구리스를 도포한 몰드에 180°C에 가열된 PG 82-34등급의 고점도 아스팔트 바인더를 부었다.
2. 토치를 사용하여 시료 표면 및 내부의 기포를 제거하였다.
3. 상온에서 120분 동안 양생시킨 후 미리 가열한 헤라와 스페츌러를 이용하여 시료 상단표면의 아스팔트 바인더의 잔여물을 제거한다.
4. 잔여물을 제거한 몰드는 시험 수행온도 -15°C, -20°C, -25°C의 저온항온조에서 15~20분 동안 냉각시켜 탈형하였다.

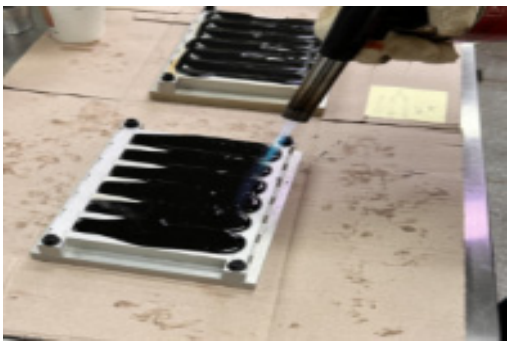
Fig. 5은 휨 시험용 시편을 제조 및 양생하는 과정을 보인 것이다. 본 논문에서 고점도 아스팔트 바인더를 종류별로 6개의 시편을 제작하여, 총 54개를 제작하였다. 저온항온조에서 -15°C, -20°C, -25°C의 시험 수행 온도에서 저온 균열이 발생하는 것을 방지하기 위해 4~6시간 동안 양생을 하였다.

3.2 시편분류

Table 1은 시편을 분류하여 기호를 정리하여 나타낸 표이다. 각 시편은 고점도 아스팔트 바인더별로 6개씩 제작을 하였다. 시편번호, 시험온도, PG등급 순으로 기호를 부여하였다. 예를 들어 A바인더의 1번 시편, 시험온도가 -15°C, PG 82-34일 경우 첫 번째 시편의 기호는 '1-1534A'이다(Fig. 6 참조).



(1) Casting specimen



(2) Remove air in specimen

(3) Curing at room temperature

(4) Flat the surface

Fig. 5. Making Specimens for Flexural beam test

Table 1. Specimen index

Manufacturer	Test temperature (°C)	PG grade	Index
A	-15	PG 82-34	1-1534A
	-20		1-2034A
	-25		1-2534A
B	-15	PG 82-34	1-1534B
	-20		1-2034B
	-25		1-2534B
C	-15	PG 82-34	1-1534C
	-20		1-2034C
	-25		1-2534C

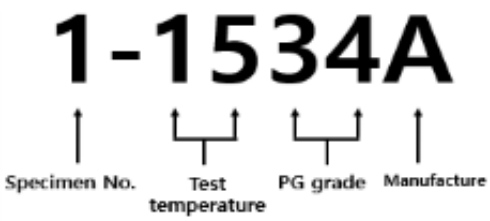


Fig. 6. Specimen index

(a) tester (b) test

Fig. 7. Flexural beam

3.3 휨 시험 수행방법

휨 시험 수행방법은 KS F 2491(2017, 아스팔트 바인더의 휨 굴곡 시험방법)에 따라 저온항온기에 4~6시간동안 3개의 시험온도(-15°C±1°C, -20°C±1°C, -25°C±1°C)에서 양생시켰다. 양생시킨 시편을 원형지지대에 10 kN용량 로드셀(Load cell)이 시편 가운데 위치하도록 설치하였다. 초기에 하중 재하로 시편의 충격을 최소하기 위해 2 mm/min으로 로드셀을 설정하였으며, 시편에 접촉 후의 재하속도를 100 mm/min으로 하중이 재하되도록 설정하였다.

Fig. 7(b)는 휨 시험 수행 장면을 보였다. 시편 설치부터 휨 시험 종료시까지 시편의 온도변화로 물리적 성질 변화를 최소화 하기 위해 약 20초 이내로 시험을 종료하였다. 동일 PG등급, 제조사별로 실험 값이 상이하며, 시험 후 시편이 하중재하의 중심으로 파단, 균열, 휨 3가지의 형태가 발생된다.

4. 수학적 모델링 및 통계분석

4.1 수학적 모델링 개요

개질제의 구성, 종류 및 첨가비율에 따라 고점도 아스팔트 바인더의 휨 시험 수행시 나타나는 시간-변위 곡선 및 시간-하중 곡선의 형태와 계산된 휨 에너지 및 휨 스티프니스가 서로 다르게 나타난다. 본 논문은 2022년 강일

환이 제시한 기존 선행연구 모델 최소제곱법과 로그-지수를 이용하여 고점도 아스팔트 바인더의 3개의 시험온도 조건(-15°C, -20°C, -25°C)별로 저온에서의 특성을 파악하였다. 수학적 모델링을 수행한 경우 고점도 아스팔트 바인더의 변별력 및 기울기의 변화에 대한 성능을 분석할 수 있다. 수학적 모델링 적합도를 평가하는 결정계수(Coefficient of determination, 이하 R^2)와 모델링의 메개변수(Parameter) A, B, C의 변동계수(Coefficient of variation, 이하 CV)를 구하여 모델링의 평가를 비교 및 분석하였다. 식 (7), 식 (8)는 R^2를 구하는 공식이며, 식 (9)은 CV를 구하는 공식을 나타내었다. CV는 인자의 변화로 발생되는 효과를 비교하는 것으로 값이 적어질수록 인자별로 상대적으로 차이가 적다는 것을 의미한다.

$$TSS = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y_i})^2 \tag{7}$$

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2} \tag{8}$$

$$CV = \left| \frac{\sigma}{\mu} \right| \tag{9}$$

여기서, y_i : i 번째 실제 값

f_i : i 번째 실제 해

$\overline{y}$: 실제 해의 평균값

σ : 변수의 표준편차

μ : 변수의 평균

4.1.1 수학적 모델링 분석 결과

Table 2부터 Table 4은 PG 82-34등급의 고점도 아스팔트 바인더 휨 시험 결과를 수학적 모델링의 결과를 요약한 것이다. Fig. 8부터 Fig. 10은 모델링의 결과를 그래프로 도식한 것이다. 수학적 모델링 예측식으로 구한 R^2은 A 바인더는 0.938에서 0.997, B 바인더는 0.923에서 0.994, C 바인더는 0.9에서 0.9로 R^2는 0.9 이상으로 수학적 모델링 결과 시험 수행온도와 관계없이 높게 나왔다.

A 바인더의 CV범위 A는 4.9%에서 6.1%, B는 18.2%~42.7%, C는 1.4%~7.5%이다. B 바인더의 CV범위 A는 3.8%에서 13.5%, B는 5.1%~22.4%, C는 0.9%~3.1%이다. C 바인더의 CV범위 A는 3.0%에서 8.6%, B는 18.0%~29.7%, C는 1.3%~3.0%이다. 제안된 수학적 모델링은 전반적으로 양호한 휨 시험 결과의 예측력을 제공한다.

Table 2. The result of mathematical modeling for binder A

Specimens			log y=Ae$^{(Bx)}$+C			R^2
			A	B	C	
PG 82 - 34	-15°C	1-1534A	-2.277	-2.112	2.727	0.944
		2-1534A	-2.363	-2.207	2.746	0.947
		3-1534A	-2.317	-2.162	2.729	0.943
		4-1534A	-2.269	-2.105	2.680	0.948
		5-1534A	-2.504	-1.559	2.651	0.984
		6-1534A	-2.541	-1.397	2.674	0.990
		μ	-2.378	-1.923	2.701	
		σ	0.117	0.351	0.038	
		CV (%)	4.9%	18.2%	1.4%	
	-20°C	1-2034A	-2.586	-5.307	2.449	0.996
		2-2034A	-2.844	-1.827	2.958	0.987
		3-2034A	-2.812	-2.674	2.677	0.997
		4-2034A	-2.428	-2.255	2.920	0.955
		5-2034A	-2.788	-4.370	2.581	0.991
		6-2034A	-2.618	-2.630	2.874	0.966
		μ	-2.679	-3.177	2.743	
		σ	0.162	1.355	0.206	
		CV (%)	6.1%	42.7%	7.5%	
	-25°C	1-2534A	-2.852	-2.780	2.799	0.967
		2-2534A	-2.751	-3.632	2.723	0.977
		3-2534A	-2.814	-3.839	2.682	0.981
		4-2534A	-2.766	-2.662	2.801	0.971
		5-2534A	-2.858	-5.523	2.378	0.994
		6-2534A	-2.458	-2.794	2.746	0.956
		μ	-2.750	-3.538	2.688	
		σ	0.150	1.090	0.159	
		CV (%)	5.4%	30.8%	5.9%	

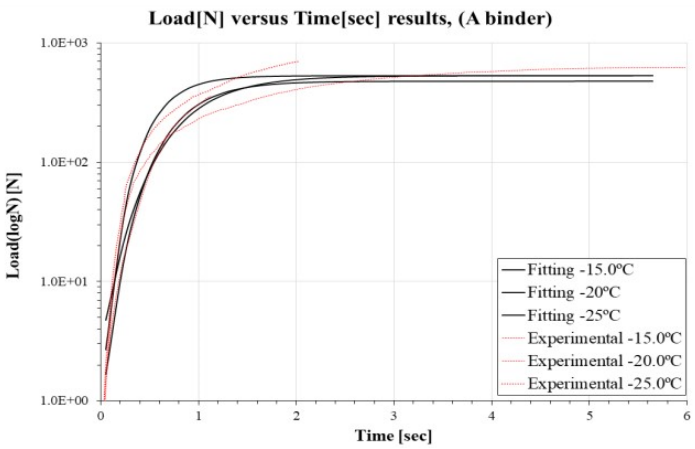


Fig. 8. The result of mathematical modeling for binder A

Table 3. The result of mathematical modeling for binder B

Specimens			log y=Ae$^{(Bx)}$+C			R^2
			A	B	C	
PG 82 - 34	-15°C	1-1534B	-2.145	-2.349	2.641	0.943
		2-1534B	-2.181	-2.419	2.708	0.936
		3-1534B	-2.244	-2.445	2.666	0.944
		4-1534B	-2.185	-2.513	2.664	0.935
		5-1534B	-2.035	-2.158	2.657	0.945
		6-1534B	-2.054	-2.348	2.690	0.947
		μ	-2.141	-2.372	2.671	
		σ	0.081	0.122	0.024	
		CV (%)	3.8%	5.1%	0.9%	
	-20°C	1-2034B	-2.165	-3.186	2.794	0.965
		2-2034B	-2.864	-5.956	2.553	0.999
		3-2034B	-2.515	-4.748	2.640	0.964
		4-2034B	-2.733	-5.292	2.738	0.984
		5-2034B	-3.028	-5.008	2.691	0.992
		6-2034B	-3.202	-3.647	2.727	0.998
		μ	-2.751	-4.640	2.691	
		σ	0.372	1.040	0.085	
		CV (%)	13.5%	22.4%	3.2%	
	-25°C	1-2534B	-2.918	-4.968	2.789	0.988
		2-2534B	-2.665	-4.064	2.860	0.979
		3-2534B	-2.578	-4.975	2.700	0.984
		4-2534B	-2.910	-5.614	2.690	0.987
		5-2534B	-2.581	-4.708	2.778	0.985
		6-2534B	-2.562	-5.933	2.626	0.982
		μ	-2.702	-5.044	2.741	
		σ	0.168	0.663	0.084	
		CV (%)	6.2%	13.1%	3.1%	

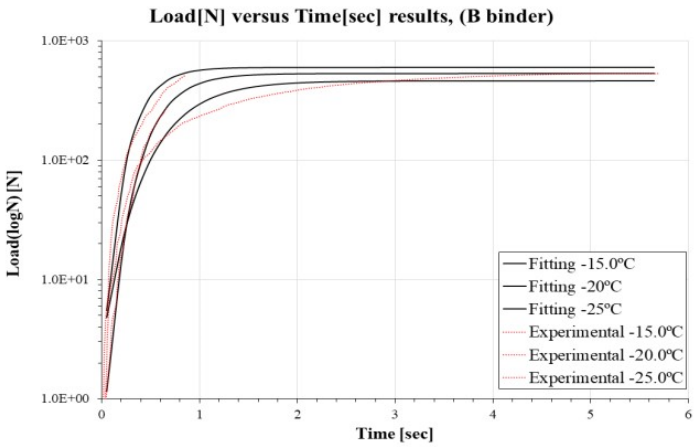


Fig. 9. The result of mathematical modeling for binder B

Table 4. The result of mathematical modeling for binder C

Specimens			log y=Ae$^{(Bx)}$+C			R^2
			A	B	C	
PG 82 - 34	-15°C	1-1534C	-1.910	-1.546	2.494	0.942
		2-1534C	-1.784	-1.572	2.491	0.935
		3-1534C	-1.967	-1.697	2.477	0.962
		4-1534C	-1.936	-1.707	2.622	0.946
		5-1534C	-2.270	-2.871	2.476	0.951
		6-1534C	-2.121	-2.673	2.392	0.964
		μ	-1.998	-2.011	2.492	
		σ	0.172	0.596	0.074	
		CV (%)	8.6%	29.7%	3.0%	
	-20°C	1-2034C	-2.652	-4.328	2.551	0.985
		2-2034C	-2.773	-4.887	2.539	0.988
		3-2034C	-2.698	-3.368	2.646	0.990
		4-2034C	-2.656	-4.456	2.527	0.982
		5-2034C	-2.552	-3.205	2.537	0.992
		μ	-2.666	-4.049	2.560	
		σ	0.080	0.728	0.049	
		CV (%)	3.0%	18.0%	1.9%	
	-25°C	1-2534C	-2.442	-4.441	2.459	0.976
		2-2534C	-2.214	-4.087	2.387	0.972
		3-2534C	-2.060	-2.856	2.440	0.954
		4-2534C	-2.432	-2.934	2.443	0.961
		5-2534C	-2.283	-3.203	2.462	0.948
		6-2534C	-1.997	-2.648	2.477	0.952
		μ	-2.238	-3.362	2.445	
		σ	0.185	0.730	0.032	
		CV (%)	8.3%	21.7%	1.3%	

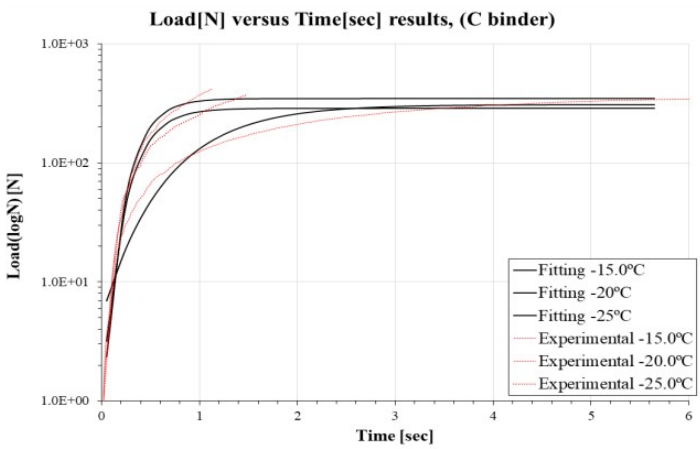


Fig. 10. The result of mathematical modeling for binder C

4.2 통계분석 개요

t-test기법은 통계학에서 두 집단의 평균 차이의 유무를 검증하는 방법으로 자주 이용된다. t-score을 계산 후 최종 통계 지표인 *p*-value를 계산한다. 계산된 *p*-value가 0.05보다 클시 통계적으로 동일하고, 0.05보다 작을시 통계적으로 상이하다. 전체 시간(n)에서 계산된 *p*-value<0.05의 계수가 60% 이상인 경우 통계적으로 상이(Statistically Sig.nificantly different:Sig.)하다고 판단하였다. Fig. 11은 t-test기법을 활용한 검증과정에 대한 개략적인 모식도를 나타내었다.

4.2.1 통계분석 결과

기존선행연구사례 모델링인 M1의 하중-시간 곡선에 대하여 PG 82-34 등급을 t-test를 하였다. Table 5부터 Table 7은 t-test(-15°C vs. -20°C, -15°C vs. -25°C, -20°C vs. -25°C)로 분석한 결과를 요약하여 나타냈다. Fig. 12부터 Fig. 14은 t-test(-15°C vs. -20°C, -15°C vs. -25°C, -20°C vs. -25°C)로 분석한 결과를 그래프로 도식하였다. A 바인더 및 B 바인더는 t-test 결과 3개(-15°C vs. -20°C, -15°C vs. -25°C, -20°C vs. -25°C)의 비교온도 조건에서 통계적으로 차이점을 보여주지 않는다. C 바인더는 -20°C vs. -25°C의 비교에서 *p-value*가 0.05보다 작게 나온 계수가 60%이상으로 통계적으로 차이점을 보여준다.

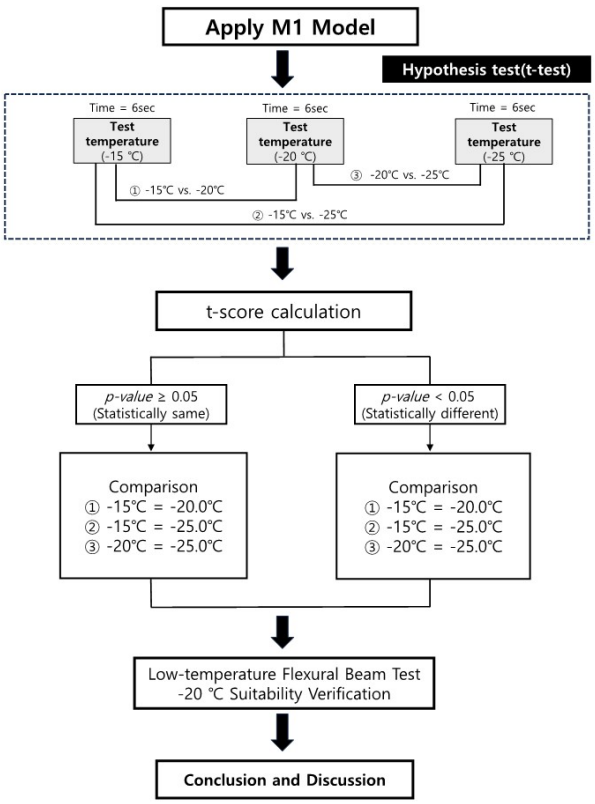


Fig. 11. The validation process utilizing t-test methodology

Table 5. The result of t-test for binder A

Time (sec)	-15°C vs.-20°C		-15°C vs.-25°C		-20°C vs. -25°C	
	p-value	Significant	*p*-value	Significant	*p*-value	Significant
0.05	46.67%	-	8.37%	Sig.	43.80%	-
0.25	8.15%	Sig.	0.45%	Sig.	88.29%	Sig.
0.45	2.76%	Sig.	0.04%	Sig.	55.52%	Sig.
0.65	0.95%	Sig.	0.05%	Sig.	36.38%	Sig.
0.85	1.14%	Sig.	0.19%	Sig.	45.30%	-
1.05	2.67%	Sig.	0.72%	Sig.	75.08%	-
1.25	5.85%	Sig.	2.43%	Sig.	97.55%	-
1.45	10.29%	Sig.	6.35%	Sig.	79.14%	-
1.65	15.14%	-	13.08%	Sig.	67.56%	-
1.85	19.75%	-	22.24%	Sig.	60.30%	-
2.05	23.80%	-	32.74%	-	55.68%	-
2.25	27.18%	-	43.32%	-	52.68%	-
2.45	29.92%	-	53.00%	-	50.72%	-
2.65	32.09%	-	61.28%	-	49.40%	-
2.85	33.78%	-	68.01%	-	48.52%	-
3.05	35.09%	-	73.31%	-	47.93%	-
3.25	36.08%	-	77.39%	-	47.52%	-
3.45	36.84%	-	80.48%	-	47.25%	-
3.65	37.41%	-	82.80%	-	47.06%	-
3.85	37.84%	-	84.53%	-	46.93%	-
4.05	38.16%	-	85.81%	-	46.84%	-
4.25	38.40%	-	86.77%	-	46.78%	-
4.45	38.59%	-	87.48%	-	46.74%	-
4.65	38.72%	-	88.00%	-	46.71%	-
4.85	38.82%	-	88.39%	-	46.69%	-
5.05	38.90%	-	88.68%	-	46.68%	-
5.25	38.96%	-	88.89%	-	46.67%	-
5.45	39.00%	-	89.05%	-	46.66%	-
5.65	39.03%	-	89.17%	-	46.66%	-

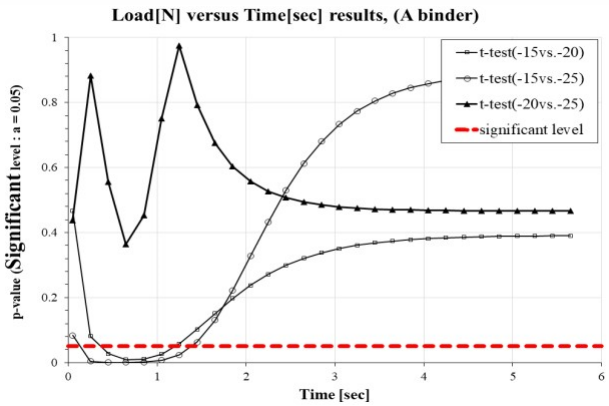


Fig. 12. The statistical analysis results for binder A

Table 6. The result of t-test for binder B

Time (sec)	-15°C vs.-20°C		-15°C vs.-25°C		-20°C vs. -25°C	
	p-value	Significant	*p*-value	Significant	*p*-value	Significant
0.05	14.16%	-	2.66%	Sig.	68.11%	-
0.25	1.15%	Sig.	0.00%	Sig.	6.99%	Sig.
0.45	0.25%	Sig.	0.00%	Sig.	4.10%	Sig.
0.65	0.06%	Sig.	0.00%	Sig.	2.14%	Sig.
0.85	0.04%	Sig.	0.02%	Sig.	5.36%	-
1.05	0.21%	Sig.	0.13%	Sig.	12.92%	-
1.25	1.30%	Sig.	0.52%	Sig.	20.26%	-
1.45	4.97%	Sig.	1.40%	Sig.	25.35%	-
1.65	11.96%	-	2.78%	Sig.	28.40%	-
1.85	20.71%	-	4.41%	Sig.	30.11%	-
2.05	28.99%	-	5.96%	-	31.04%	-
2.25	35.59%	-	7.23%	-	31.53%	-
2.45	40.37%	-	8.18%	-	31.79%	-
2.65	43.63%	-	8.83%	-	31.92%	-
2.85	45.79%	-	9.27%	-	32.00%	-
3.05	47.18%	-	9.56%	-	32.03%	-
3.25	48.08%	-	9.75%	-	32.05%	-
3.45	48.65%	-	9.87%	-	32.06%	-
3.65	49.01%	-	9.94%	-	32.07%	-
3.85	49.23%	-	9.99%	-	32.07%	-
4.05	49.38%	-	10.02%	-	32.07%	-
4.25	49.47%	-	10.04%	-	32.07%	-
4.45	49.52%	-	10.05%	-	32.07%	-
4.65	49.56%	-	10.05%	-	32.07%	-
4.85	49.58%	-	10.06%	-	32.07%	-
5.05	49.60%	-	10.06%	-	32.07%	-
5.25	49.60%	-	10.06%	-	32.07%	-
5.45	49.61%	-	10.06%	-	32.07%	-
5.65	49.61%	-	10.07%	-	32.07%	-

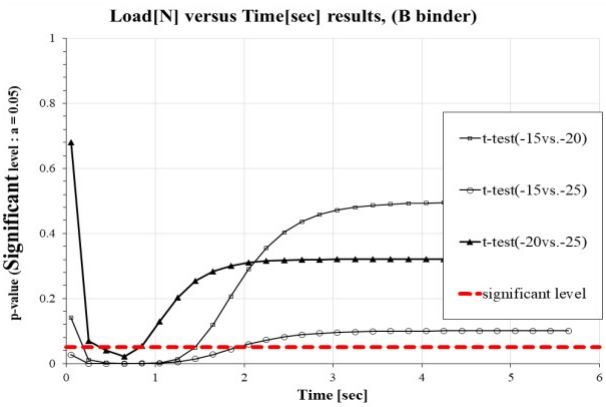


Fig. 13. The statistical analysis results for binder B

Table 7. The result of t-test for binder C

Time (sec)	-15°C vs.-20°C		-15°C vs.-25°C		-20°C vs. -25°C	
	p-value	Significant	*p*-value	Significant	*p*-value	Significant
0.05	1.00%	Sig.	12.28%	-	3.25%	Sig.
0.25	1.59%	Sig.	3.10%	Sig.	21.71%	-
0.45	0.30%	Sig.	1.22%	Sig.	4.80%	Sig.
0.65	0.02%	Sig.	0.52%	Sig.	0.87%	Sig.
0.85	0.00%	Sig.	0.49%	Sig.	0.13%	Sig.
1.05	0.01%	Sig.	1.10%	Sig.	0.09%	Sig.
1.25	0.02%	Sig.	3.24%	Sig.	0.21%	Sig.
1.45	0.06%	Sig.	11.08%	-	0.39%	Sig.
1.65	0.21%	Sig.	35.50%	-	0.56%	Sig.
1.85	0.57%	Sig.	77.99%	-	0.68%	Sig.
2.05	1.29%	Sig.	82.50%	-	0.75%	Sig.
2.25	2.42%	Sig.	57.10%	-	0.80%	Sig.
2.45	3.86%	Sig.	42.60%	-	0.82%	Sig.
2.65	5.44%	-	34.28%	-	0.84%	Sig.
2.85	6.95%	-	29.30%	-	0.84%	Sig.
3.05	8.28%	-	26.18%	-	0.85%	Sig.
3.25	9.39%	-	24.16%	-	0.85%	Sig.
3.45	10.27%	-	22.80%	-	0.85%	Sig.
3.65	10.95%	-	21.87%	-	0.85%	Sig.
3.85	11.46%	-	21.23%	-	0.85%	Sig.
4.05	11.85%	-	20.77%	-	0.85%	Sig.
4.25	12.13%	-	20.45%	-	0.85%	Sig.
4.45	12.34%	-	20.22%	-	0.85%	Sig.
4.65	12.49%	-	20.05%	-	0.85%	Sig.
4.85	12.60%	-	19.93%	-	0.85%	Sig.
5.05	12.68%	-	19.84%	-	0.85%	Sig.
5.25	12.74%	-	19.78%	-	0.85%	Sig.
5.45	12.78%	-	19.73%	-	0.85%	Sig.
5.65	12.81%	-	19.70%	-	0.85%	Sig.

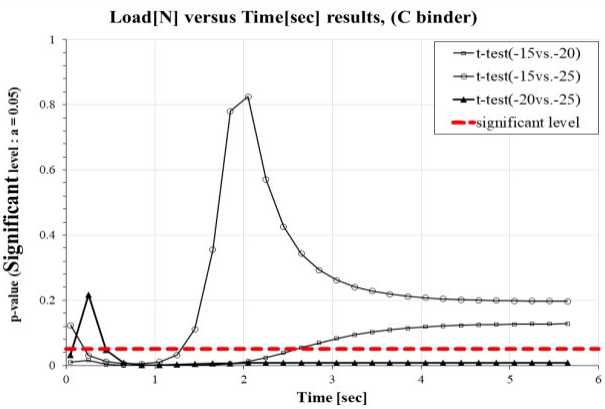


Fig. 14. The statistical analysis results for binder C

5. 결 론

본 연구는 PG 82-34등급 3종의 고점도 아스팔트 바인더로 현재 휨 시험수행 온도인 -20°C에서 실시해야 하는지, 혹은 다른 시험 온도조건을 고려해야 하는지 수학적 모델링(Mathematical modeling approach) 및 t-test를 이용하여 분석하였다. -15°C, -20°C, -25°C에서의 통계분석 결과 PG 82-34 등급 3종 중 1개의 고점도 아스팔트 바인더만 -20°C와의 비교에서 통계적으로 상이하였다. 따라서, PG 82-34등급의 고점도 아스팔트 바인더의 휨 시험 결과 -20°C와의 비교에서 1종만 통계적으로 상이하며, 나머지 2종은 -20°C와의 비교에서 온도조건이 달라도 통계적으로 동일하여 이는 현재 휨 시험온도 조건인 -20°C를 적용하는 것이 타당하다.

또한, 본 연구에서는 지수함수형태의 수학적 모델링 하나만을 고려하였으나, 보다 예측력이 높은 수학적 모델링을 추가로 고려하여 각 시험 온도에서의 휨 시험 결과값의 차이를 수치적으로 분석하고, 이를 통계분석하여 비교 분석할 필요가 있다.

참고문헌

Cook, R.D. and Weisberg, S. (1999). “Applied regression including computing and graphics”, Vol. 488. Jhon Wiley & Sons, Inc.

Kang, I.H. (2022). “Evaluation of Low Temperature Performance of High Viscosity Asphalt Binder by Means of Mathematical Modeling Approach”, Seoul National University of Science & Technology Ph.D. thesis.

KS F 2491 (2017). “Standard test method for the flexural beam test for asphalt binder”, Korea Agency for Technology and Standards, Korea Industrial Standards Commission.

Moon, K.H. (2010). “Comparison of thermal stresses calcluated from asphalt binder and asphalt mixture creep compliance data”, M.S. thesis, University of Minnesota (Twin Cities), U.S.

大野 滋也, 本松資朗 and 高原健吾 (2002). “高粘度改質アスファルトの新たな評価手法の開発”, NEXCO総研 高速道路技術センター, 技術情報誌 EXTEC (Expressway Technology Center), No.65.

日本改質アスファルト協会技術委員会 (2021). “バインダの曲げ試験方 法」導入背景と試験方法の紹介”, https://www.jmaa.jp/pdf/test-mage.pdf (Online access : 2021.08.10.)

村山 雅人 and 濱田 幸二 (2005). “舗装技術の質疑応答 第9巻, 建設図書”, pp. 206-210.