

Scientific Paper

마셜안정도 시험기의 적정성을 위한 표준시료 제안 연구

최준성^{1*} · 김진수² · 김상진³

¹인덕대학교 토목환경공학과 교수, ²인덕대학교 토목환경공학과 학사과정, ³인덕대학교 토목환경공학과 학사과정

A study on proposal of standard sample for marshall stability test

Junseong Choi^{1*}, Jinsu Kim² and Sangjin Kim³

¹Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Induk University

²Bachelor's Course, Department of Civil & Environmental Engineering, Induk University

³Bachelor's Course, Department of Civil & Environmental Engineering, Induk University

*Corresponding author: Tel. +82-2-950-7565, E-mail. soilpave@induk.ac.kr

Received: December 7, 2020; Revised: December 18, 2020; Accepted: December 21, 2020

ABSTRACT

In addition to the adequacy evaluation of existing equipment for Marshall stability manufactured in Korea, a standard sample is required to verify the new Marshall stability test using IoT system in the era of the 4th industrial revolution. In this study, a standard sample concept was established by selecting polyurethane, which can be produced with the same composition ratio, as the standard material, since comparative analysis is not possible with a general asphalt mixture. In order to evaluate the adequacy and validity of the standard sample proposed in this study, the UTM experiment and experiments for the resting period were conducted, and a comparative study between the equipments through the Round-Robin Test was conducted to confirm the applicability of the standard sample. From the comparative tests, the repeatability of the standard sample was confirmed. And it was found that the standard sample can be used to compare and analyze equipments, as the Round-Robin test shows the relative error of 5.1% for the Marshall stability test, 0.5% for the indirect tensile strength test, and 6.5% for the Kim test. In the future, the standard sample proposed in this study requires additional research on the standardization and the reference value through the round-robin test of domestic equipments.

Keywords: Marshall stability test, Standard sample for verification, Resting period, Repeatability, Round-Robin Test

1. 서론

현재 국내외에서 제작한 마셜안정도 시험기의 경우 각 회사별로 기존의 마셜안정도 시험기를 KS 기준에 맞



추어 제작 시 속도제어 기준만이 있어 장비운용 및 데이터처리 정확성 등에 대한 검토가 필요하다. 따라서 다양한 국내외 마샬 안정도 시험기의 데이터 Sampling Rate에 따른 안정도 값 추정 편차와 시험기 자체 편차의 감소를 고려하여야 한다. 이와 같이 기존 장비의 적정성 평가와 더불어 4차 산업혁명 시대를 맞이하여 IoT 시스템 도입을 통한 새로운 장비를 제작하여 장비 검증을 할 때 오차범위의 같은 결과가 도출되는지 확인하기 위한 검증용 표준시료가 필요하다. 검증용 표준시료로서 동일한 배합의 동일한 바인더, 동일한 온도에서의 아스팔트 혼합물을 혼합 및 다짐하여 제작한 아스팔트 혼합물 공시체들을 사용할 때, 각각 공시체들 구성 비율이 정확히 일치하지 않아 장비 간 비교분석을 할 수가 없다. 검증용 표준시료는 안전성과 균질성이 입증된 시료여야 하고, 시료의 불균질성은 최소화하도록 설계가 되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 표준시료를 제안하고, 제안한 표준시료에 대한 실내실험과 Round - Robin Test를 통해 적합성과 타당성을 실시하여 검토하고자 한다.

2. 표준시료 필요성

2.1 표준시료 제작

마샬 안정도 시험기를 신규 제작하거나 기존의 마샬 안정도 시험기를 KS 기준에 맞추어 제작하는 경우, 이에 대한 검토를 위해 Round-Robin Test가 필요하다. 이때, 국내외 마샬 안정도 시험기의 Sampling Rate에 따른 안정도 값 추정 편차와 시험기 자체의 편차 감소를 고려하여야 한다. 이에 새로운 장비를 제작하여 시료에 관한 검증을 하였을 때, 같은 결과가 도출되는지 확인하기 위해 표준시료는 안전성과 균질성이 입증된 시료여야 하고, 시료의 불균질성이 최소화되도록 설계가 되어야 한다. 일반적인 폴리우레탄의 성분표는 Table 1과 같으며(Ham, 2013), 본 연구에서는 Table 2의 물성을 가진 폴리우레탄 재질의 표준시료를 Fig. 1과 같이 제작 활용하였다. 표준시료는 KS F 2337, KS F 2376, 아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침의 표기되어있는 마샬 안정도, 변형강도, 간접인장강도 시험을 실시할 수 있는 높이 63.5 mm, 지름 101.6 mm로 제작하였다. 이 표준시료를 사용하여 마샬 안정도, 변형강도, 간접인장강도 실험을 실시한 후 사용성 및 적합성을 분석하고자 한다.

Table 1. General polyurethane component

Component	Content (%)
Polyether polyop (sucrose)	25
Polyether polyop (Amine)	50
Allerster Polyol	25
tris Phosphate	25
Polydimethylsiloxan	1.5
three-ga amine	4
H ₂ O	2
methyl formate	8
Di octyl phthalate	5
formic acid	1

Table 2. Physical properties of polyurethane

Item	Unit	
hardness	A type	92 ± 2
100% modulus	Kgf/cm ²	65 ± 20
ultimate tensile strength	Kgf/cm ²	280 ± 25
Tear Strength	Kgf/cm	75 ± 20
tensile stretch	%	485 ± 50
Resilience	%	40 ± 5

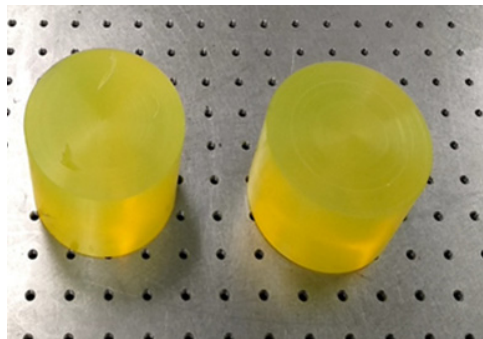


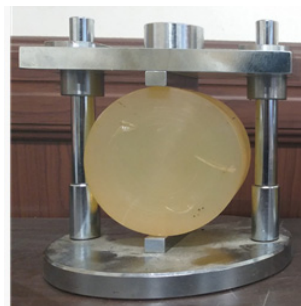
Fig. 1. Polyurethane Standard Sample

2.2 표준시료 검증을 위한 마샬안정도 장비 조사

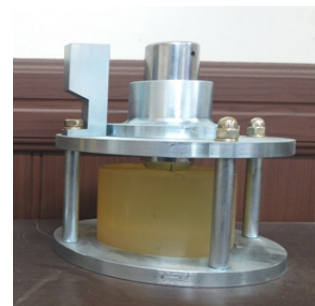
마샬안정도 실험을 위한 표준시료를 실험하기 위하여 국내 마샬안정도 장비를 Table 3과 같이 정리하였다. Table 3의 조사 결과, 각 마샬안정도로 장비의 데이터 획득 속도가 다를 수 있다. 또한 마샬안정도 시험, 변형강도시험, 간접인장강도시험을 위해서 KS F 2337, KS F 2376 및 아스팔트 혼합물 생산 시공지침에 따라 실험이 가능하여야 하며, 각 Fig. 2와 같이 각 실험에 대한 실험용 몰드를 보유하고 있어야 한다.



(a) Marshall stability test zig



(b) Indirect tensile strength zig



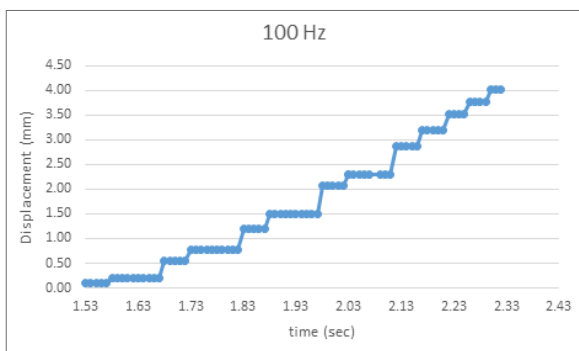
(c) Kim test zig

Fig. 2. Necessary zig for each experiment

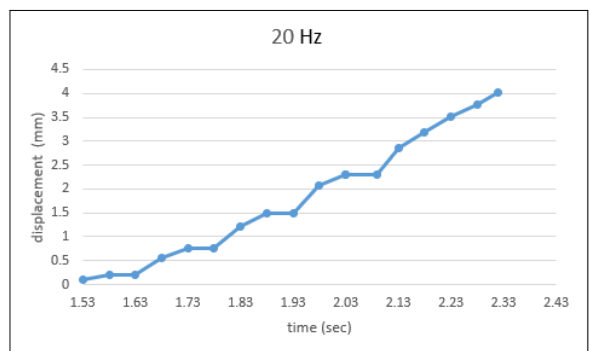
Table 3. Domestic Marshall Stability Equipment Survey Results

Manufacturer	possible experiment	Hz	Note
Global Equipment company	Marshall stability test	40~50 (Effective sampling rate 40 hz)	NE 12697, ASTN D. AASHTO T 245
H Research Institute	Marshall stability test, Kim tast, Indirect tensile strength	10	load call displacement sensor, Use Certification Authority Equipment
EX Research Institute	Marshall stability test	unknown	Integral form Indicator
K University	Marshall stability test	10	Integral form Internal software Save Excel File
I University	Marshall stability test, Kim tast, Indirect tensile strength	17	External software Measure and analyzable
IoT Development product	Marshall stability test, Kim tast, Indirect tensile strength	20	IG-IoT Wireless Sharing Platform

또한 Hz을 통한 데이터 받는 횟수에 따라 Fig. 3과 같이, 같은 데이터라도 데이터획득 보드 및 센서의 성능에 따라 100 Hz일 때와 20 Hz의 데이터획득이 달라지므로 동일시간대에서 데이터를 비교분석을 해야 한다. 이에 현재 비교 가능한 마샬 안정도 장비 중 마샬 안정도 및 간접인장강도, 변형강도 시험이 가능한 장비 중 각 시험에 대한 몰드도 보유하고 있으며, 비슷한 Hz로 데이터획득이 가능한 I 대학의 장비와 IoT 개발제품을 통해 20 Hz의 속도로 마샬 안정도 및 간접인장강도, 변형강도 시험을 Round-Robin Test 통하여 표준시료의 적용성 평가를 시행하였다.



(a) 10 Hz Data Acquisition Results



(b) 20 Hz Data Acquisition Results

Fig. 3. Comparative analysis according to Data Acquisition Hz

2.3 국내 문헌조사를 통한 실험조건 결정

마셜 안정도 Round-Robin Test를 위해 국가표준 및 아스팔트 혼합물 생산 시공지침에 제시되어있는 실험방법 및 기준을 검토하였다. KS 및 아스팔트 시공지침에는 마셜 안정도(KS F 2337), 간접인장강도(아스팔트 혼합물 생산 시공지침, 2015), 변형강도(KS F 2376)의 시험 방법뿐만 아니라 각각의 기준을 Table 4와 같이 제시하고 있다. 마셜 안정도 시험은 가열 아스팔트 혼합물의 배합 결정을 위해 하는 시험으로서 50.8 mm/min 속도로 일정하게 하중을 가하여 흐름값이 각 기준값 사이일 때의 최대하중을 구하는 실험으로 최대하중에 Table 5와 같이 공시체의 높이를 측정하여 그에 따른 보정계수를 곱하여 산정하며, 변형강도의 경우 실제 현장의 차량 율하중에 의한 메커니즘을 고려한 시험으로써 30 mm/min으로 아스팔트 혼합물의 소성변형과 유사하게 압밀 전단에 의한 변형이 유발되도록 하중봉의 의한 압력이 가해질 때 하중-변위 곡선을 얻을 수 있다. 이때 최대하중(P)와 표면으로부터 들어간 수직변형(y)을 읽어 식 Eq. (1)을 통해 산정한다(Kim, 2012). 인장응력은 포장체 내에서 차량 하중의 압축하중으로 인해 발생하여 균열을 유발하므로, 아스팔트 혼합물의 균열 저항성 정도를 측정하기 위하여 간접인장강도를 원주형 공시체의 수직인 직경면 방향으로 50 mm/min의 속도로 압축하중을 주어 하중 재하시 파괴될 때 발생하는 인장응력 개념으로 식 Eq. (2)를 통해 산정한다.

$$S_D = \frac{0.32P}{(10 + \sqrt{20y - y^2})^2} \tag{1}$$

여기서, S_D = 변형강도, P = 최대 하중, y = 수직 침하 깊이

$$S_r = \frac{2P}{\pi Dt} \tag{2}$$

여기서, S_r : 간접인장강도, P : 공시체 하중, D : 공시체 지름, t : 공시체 높이

Table 4. Quality Standard for Asphalt Mixture

Classification	Surface course or intermediate course		Base course
	WC-1 ~ 4, MC-1	WC-5, 6	BB-1 ~ 4
S_D (MPa)	4.25 more them (3.2 more them)		3.2 more them (2.7 more them)
Stability (N)	7500 more them (5000 more them)	6000 more them	5,000 more them (3500 more them)
Flow (1/100 cm)	20~40		10~40
S_r (N/mm ²)	0.8 more them		0.6 more them

Table 5. Marshall stability correction factor table

Test piece thickness (mm)	Compensating factor
25.40	5.56
26.90	5.00
⋮	⋮
60.30	1.09
61.90	1.04
63.50	1.00
65.10	0.96
66.70	0.93
⋮	⋮
73.00	0.81
74.60	0.78
76.20	0.76

국내 마샬 안정도 및 변형강도, 간접인장강도의 일반적인 범위를 문헌조사 결과, 마샬 안정도 시험의 경우 Table 6과 같이 흐름값은 WC-1~4, MC-1과 WC 5, 6의 경우 20~40 mm, 기층용일 때 10~40 mm 사이이며 국내 마샬 안정도 시험도 흐름값에 따른 하중을 표층 및 기층에서 평균 18,000 N의 범위임을 알 수 있었다. 이상의 내용을 토대로 본 연구에서도 흐름 값이 40 mm일 때 최대하중을 측정하여 보정계수를 곱한 후 마샬 안정도 값을 산정하였다. 간접인장강도의 국내 문헌 조사결과, Table 7과 같으며 하중은 9,000~10,000 N까지 실험을 실시하였으며 이때 간접인장강도는 0.8~1.14 MPa임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 간접인장강도 최솟값 기준인 0.8 MPa에 맞추어서 하중 측정 인디케이터에서 강제 종료 방법으로 시험을 시행하였다. 변형강도 실험의 국내 문헌조사 결과는 Table 8과 같으며 선화다짐 75회로 제작한 표준시료 시험 시, 기준 4.25 MPa 이상의 값들을 정리한 것이며, 본 연구에서는 기준 4.25 MPa 이상의 값 중 하중 기준 5,000 N에 맞추어 하중 측정 인디케이터에서 강제 종료 방법으로 시험을 실시하였다.

Table 6. Results of analysis of domestic literature on Marshall stability value

Standard	Item	Unit	Criteria	Stability Range (N)
Surface course (WC-1)	Stability	(N)	7,500 more them	14,498~22,337
	Flow	(1/100 cm)	20~40	
Surface course (WC-2)	Stability	(N)	7,500 more them	3,200~21,540
	Flow	(1/100 cm)	20~40	
Room temperature asphalt Base course mixture	Stability	(N)	2,500 more them	15,450~28,143
	Flow	(1/100 cm)	20~40	
Base course (BB-2)	Stability	(N)	5,000 more them	15,450~28,143
	Flow	(1/100 cm)	10~40	
Base course (BB-3)	Stability	(N)	5,000 more them	15,450~28,143
	Flow	(1/100 cm)	10~40	

Table 7. Results of indirect tensile strength analysis in domestic literature

Standard	Load (N)	Criteria (N/mm^2)	S_r Range (N/mm^2)
Surface course (WC-1)	10,168.89	0.8 more them	0.90 ~ 1.14
Surface course (WC-2)			
Room temperature asphalt base course mixture	9,723.85	0.4 more them	0.82 ~ 1.10
Medium temperature asphalt base course mixture	8,964.18	0.8 more them	0.81 ~ 0.96
Base course (BB-2)	9,471.03	0.6 more them	0.80 ~ 1.10
Base course (BB-3)			

Table 8. Results of analysis of domestic literature on the Kim test

Standard	Load (N)	Criteria (N/mm^2)	S_D Range (N/mm^2)
Surface course (WC-1)	2,789.87 ~ 4,014.07	4.25 more them	4.33 ~ 6.23
Surface course (WC-2)			
Room temperature asphalt Base course mixture	2,313.08 ~ 6,101.64		3.59 ~ 9.47
Medium temperature asphalt base course mixture	2,094.02 ~ 2,564.36	3.20 more them	5.67 ~ 7.79
Base course (BB-2)	2,293.75 ~ 2,770.54		3.22 ~ 4.30
Base course (BB-3)			

3. 표준시료 제작 및 표준시료 물성 결정

3.1 제작 표준시료의 UTM 물성 실험

본 연구에서 제작한 표준시료를 이용한 마샬 안정도 시험을 실시하기 전 표준시료의 물성값을 위한 실험을 실시하였다. 실험은 UTM 실험을 실시하였으며 UTM 실험기기는 고무 플라스틱과 종이, 철사 등 모든 재료의 압축 및 인장시험을 통한 재료의 물성값을 도출할 수 있는 기기로 이 기기를 통하여 우레탄 표준시료를 장착하여 압축 시험을 실시하였다. 실험 전 공시체의 단면적 계산 결과 7.854 cm^2 로 나왔으며 실험 시 실험기기의 마샬 안정도 로드셀의 최대 하중이 5 ton 이기 때문에 실험 시 5 ton까지 힘을 가했으며 이때 공시체의 최대 변형률은 0.32%로 0.5% 단위로 변형을 주어 변형률에 대한 하중을 압력 하중/단면적을 측정 및 계산하여 응력을 도출 후에 응력/변형률을 계산하여 탄성계수를 Table 9, Fig. 4와 같이 나타내었다. UTM 압축시험 결과 최대 하중 재하시의 탄성계수는 $2,109 \text{ kgf/cm}^2$ 이고, 하중 제거 시의 탄성계수는 $1,943 \text{ kgf/cm}^2$ 로 나타나며 Fig. 4과 같이 각 구간별로 미분을 하여 기울기가 같은 0.1~0.15% 구간에서의 탄성계수를 미분하면 하중 재하시 값은 $1,578 \text{ kgf/cm}^2$ 이며 하중 제거 시의 미분한 탄성계수는 $1,655 \text{ kgf/cm}^2$ 로 변형이 나타난다는 것을 알 수 있었으며 이때의 실제 하중

재하시의 탄성계수는 $2,788.36 \text{ kgf/cm}^2$ 하중 제거시의 탄성계수는 $1,336.90 \text{ kgf/cm}^2$ 로 이 두 값의 탄성계수 평균은 $1,900 \text{ kgf/cm}^2$ 이 나타난다는 것을 알 수 있었다. 표준시료의 물성으로 변형률은 0.1~.015% 구간, 탄성계수는 $1,900 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 제시하였다.

Table 9. Results of UTM compression experiments on urethane standard samples

Cross-sectional area (cm ²)	7.85	7.85	7.85	7.85	7.85	7.85	7.85
Strain rate	0.05%	0.10%	0.15%	0.20%	0.25%	0.30%	0.32%
Compression load (kgf)	13.5	21.9	28.1	34.3	41.5	49.7	50.9
Rebound load (kgf)	3.3	10.5	17	24.1	33.2	45.8	50.9
Stress (kgf/cm ²)	1.719	2.788	3.578	4.367	5.284	6.328	6.481
Unloading stress (kgf/cm ²)	0.420	1.337	2.165	3.069	4.227	5.831	6.481
Under load Modulus of elasticity	3437.747	2788.395	2385.202	2183.606	2113.578	2109.334	-
Under load Modulus of elasticity Differential	2139	1578.8	1578.8	1833.5	2088.1	763.94	-
Unloading Modulus of elasticity	840.338	1336.902	1443.005	1534.254	1690.862	1943.812	-
Unloading Modulus of elasticity Differential	1833.5	1655.2	1808	2317.3	3208.6	3055.8	-

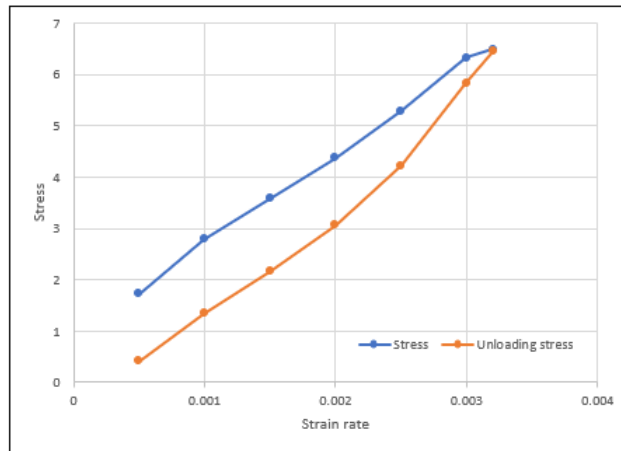


Fig. 4. Results of UTM compression experiments on urethane standard samples

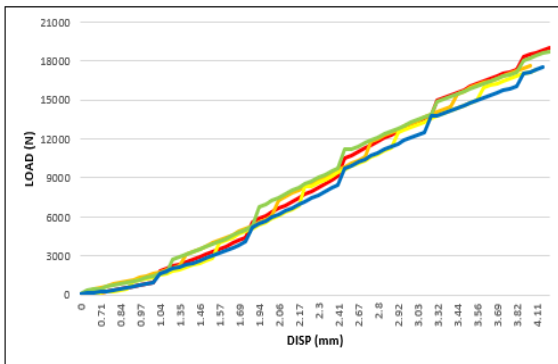
3.2 표준시료 휴지기 결정

마찰 안정도 및 간접인장강도, 변형강도를 실험 시 표준시료에 직접적인 하중을 주어 표준시료의 변형이 생기면 연속적으로 실험 시 또는 다음 실험 시 표준시료의 변형이 생겨 다른 값이 나타낼 수 있다. 이러한 현상의 원인

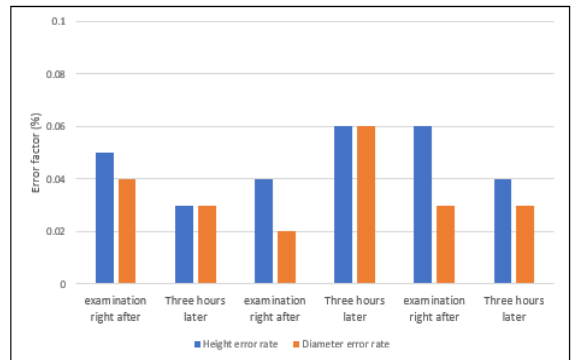
을 확인하고자 마샬 안정도 실험기를 통한 실험 시 우레탄의 성질을 이용한 표준시료의 회복 시간을 분석하였다. 이는 표준시료의 재현성을 확인하고 다음 실험 시 동일한 값이 나타나도록 표준시료의 휴지기를 결정하여야 하기 때문이다.

3.2.1 마샬 안정도 시험을 통한 결정

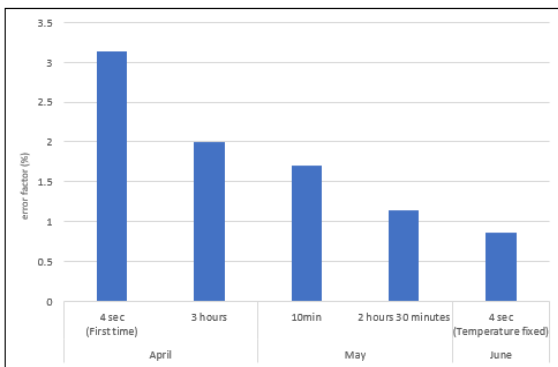
마샬 안정도 시험결과 실험자가 변위 측정 인디케이터를 보고 흐름값 40에서 강제 종료 후 프로그램상 측정된 값으로서 흐름치의 차이를 나타낼 수 있다. Fig. 5(a)의 시험에서 시험 후 시험 준비 시간 4초를 거친 후, 다시 실험했을 때의 표시된 것과 같이 오차가 발생하여 오차 확인을 위해 Fig. 5(b)와 같이 표준시료의 회복성 시험을 실시하였다. 시험 결과, 시험 후 약 3시간의 휴지기를 가져야 하는 것으로 판단이 되었으나, Fig. 5(b)에 따라 초기 4초 반복 시험에서 온도 조건을 고려하지 않은 것으로 판단하였다. 이에 온도 조건을 고정하여 Fig. 5(c)과 같이 재실험하였다. 실험 결과 Table 10과 같이 4초 후 흐름값 40을 기준으로 하였던 시험의 안정도 분석 결과 최대 오차가 0.36% 정도로 재현성이 나타나는 것을 알 수 있다.



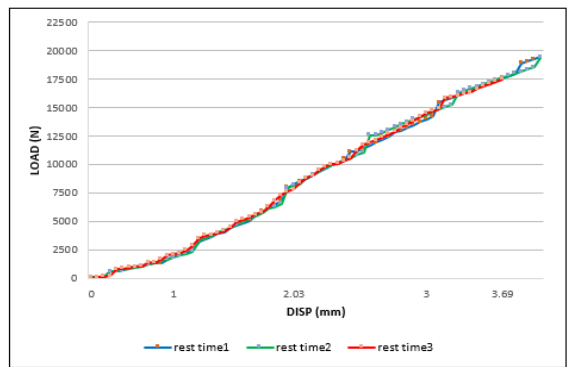
(a) Initial Marshall Four-Second Repetition



(b) Resiliency Test Results for Standard Samples



(c) Resilience Test Determination Test Results



(d) Temperature fixed 4 second repetitive test results

Fig. 5. Verification of repeatability through Marshall Stability Test and results

Table 10. Results of existing Marshall Stability Test using standard samples (Temperature fixed)

P (N)	Relative error (%)	Flow (1/100cm)	Note
17,820	0.39	40.0	Output value in program when external indicator 40 is fixed
17,800	0.28	40.0	
17,630	0.39	40.0	

3.2.2 간접인장강도, 변형강도시험을 통한 적정성 평가.

마샬 안정도 시험을 통한 표준시료의 변형회복 시간은 약 4초인 것으로 확인되었으나 연속실험을 수행하여도 실험 세팅의 시간을 고려한다면 표준시료의 휴지기가 필요 없음을 알 수 있었다. 그러나 마샬 안정도 시험기를 통하여 간접인장강도나 변형강도시험을 실시하므로 이에 대한 적정성을 평가하여야 한다. 변형강도 시험은 하중 기준 5,500 N에 맞추어서 3번 실험한 결과 Table 11과 같이 나왔으며 시험 결과 국내 변형강도 기준인 4.25 MPa 이상의 값을 넘고 아스팔트 혼합물 생산 및 시공지침(2009)의 값들과의 변형강도 시험 시에 측정되는 값을 변형강도의 Eq. 1을 이용하여 산정하였다. 변형강도 시험 결과 반복 실험 시 횟수가 거듭될수록 생기는 상대 오차의 최댓값이 0.5%인 것을 보아 반복 재현성이 나타남을 알 수 있다. 또한, 변형강도 수치는 큰 차이를 보이지 않고 있어 휴지기의 상관없이 표준시료의 재현성이 나타난 것을 알 수 있었다.

Table 11. Kim tsat results of conventional equipment using standard samples

Number of tests	Average load (N)	S _D (MPa)	Relative error (%)
1	5,460	5.15	Criteria
2	5,450	5.12	0.5%
3	5,480	5.17	0.4%

간접인장강도 재현성 시험을 실시한 결과, 다음 Table 12와 같이 기준치 4.25 MPa 시험 시에 측정되는 값을 간접인장강도의 Eq. 2를 이용하여 산정하였다. 간접인장강도 시험 결과 반복 실험횟수가 거듭될수록 생기는 상대 오차의 최댓값이 3.09%로 반복 재현성이 나타남을 알 수 있다. 또한, 간접인장강도 수치는 큰 차이를 보이지 않고 있어 휴지기의 상관없이 표준시료의 재현성이 나타난 것을 알 수 있었다.

Table 12. Test results of indirect tensile strength of existing equipment using standard samples

Number of tests	Average load (N)	S _r (N/mm ²)	Relative error (%)
1	8324.5	0.835	3.09
2	8335.2	0.823	1.06
3	8224.6	0.812	0.25
4	8204.9	0.810	Criteria
5	8250.0	0.817	0.86
6	8240.0	0.816	0.74

4. 제작 표준시료의 Round - Robin Test

본 연구에서 제안한 표준시료를 이용하여 기존의 마셜안정도 시험기(I 대학)의 IG-IoT 마셜안정도 시험기에 대하여 (IoT 개발제품) Round - Robin Test를 실시하였다. 마셜안정도 실험은 휴지기 실험과 동일한 방법으로 마셜안정도 시험의 경우 흐름값 40에서 간접인장강도의 경우 간접인장 지그를 통하여 8,500 N까지 재하 하였으며 변형강도 경우 하중 5,000 N으로 이하까지 실험하였다. 실험 결과는 다음 Table 13~15와 같으며 마셜안정도 시험의 경우 두 기기의 오차 평균 5.1%, 간접인장 강도시험의 경우 0.5%, 변형강도의 경우 6.5%로 각 장비의 차이가 나타남을 알 수 있다. 추후 더 많은 장비를 통한 Round - Robin Test를 실시하여 빅 데이터를 통한 데이터를 수집 후 각 실험값에 대한 통계분석을 통하여 표준시료의 표준값에 관한 연구가 필요하며 나아가 현재 아스팔트 혼합물의 시험들의 역학 특성에 따른 표준시료의 기준값 제시가 필요할 것이다.

Table 13. Comparison test for Marshall stability test using standard sample

IoT Development product		I University		Relative error %
P (N)	Flow (1/100 cm)	P (N)	Flow (1/100 cm)	
16110	36.0	17303	36.0	7.4
15906	37.0	17347	37.0	9.1
16889	38.0	17355	38.0	2.8
17013	39.0	17610	39.0	3.5
17205	40.0	17750	40.0	3.2
Relative error Average				5.1

Table 14. Comparison test for Indirect tensile strength using standard samples

IoT Development product		I University		Relative error %
P (N)	S _r (MPa)	P (N)	S _r (MPa)	
6094	0.60	6130	0.60	0.6
6621	0.65	6580	0.65	0.6
7058	0.70	7110	0.70	0.7
7607	0.75	7580	0.75	0.4
8157	0.80	8170	0.80	0.2
Relative error Average				0.5

Table 15. Comparison test for Kim test using standard specimen

IoT Development product			I University			Relative error %
P (N)	y (mm)	S _D (MPa)	P (N)	y (mm)	S _D (MPa)	
3900	2.75	4.3	3900	3.25	4.1	4.9
4000	2.85	4.48	4000	3.44	4.12	8.7
4200	2.95	4.60	4200	3.62	4.30	7.0
4600	3.29	4.85	4600	3.98	4.62	5.0
5000	3.60	5.11	5000	4.15	4.79	6.7
Relative error Average						6.5

5. 결론

본 연구에서는 마셜안정도시험기를 위한 표준시료를 제안하고, 제안한 표준시료에 대한 실내시험과 Round - Robin Test를 통해 적합성과 타당성을 분석하였다. 분석결과, 본 제안시료는 마셜안정도시험기들을 분별력 있게 평가할 수 있는 방안이 될 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구결과를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구를 통해 제안된 표준시료가 갖는 특성을 요약하면 다음과 같다. 마셜안정도, 변형강도, 간접인장강도 시험을 실시할 수 있는 높이 63.5 mm 지름 101.6 mm로, 본 연구를 통하여 표준시료 제작하였으며. UTM 압축시험 결과 최대 하중 재하시의 변위를 구간별로 미분을 하여 기울기가 같은 0.1~0.15% 구간에서 실제 하중 재하시의 탄성계수는 2788.36 kgf/cm^2 하중 제거 시의 탄성계수는 1336.90 kgf/cm^2 로 이 두 값의 탄성계수 평균은 $1,900 \text{ kgf/cm}^2$ 이 나타난다는 것을 알 수 있었으며 표준시료의 물성으로 변형률은 0.1~. 015% 구간, 탄성계수는 $1,900 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 제시하였다.
2. 마셜안정도 시험을 통한 표준시료의 변형회복은 약 4초인 것으로 분석하였으나, 실험 세팅의 시간을 고려한다면 표준시료의 휴지기가 필요 없음을 알 수 있었다. 또한, 마셜안정도 시험기를 통해 간접인장강도 또는 변형강도시험을 수행하는 경우를 고려한 적정성 평가결과, 간접인장강도의 경우 0.5%, 변형강도의 경우 3.09%로 휴지기의 상관없이 표준시료의 재현성이 나타난 것을 알 수 있었다
3. 본 연구에서는 마셜안정도 시험기에 적합한 재질의 표준시료 제작 및 적합성과 타당성을 분석하기 위해 마셜안정도, 변형강도, 간접인장강도의 Round - Robin Test를 실시하였다. 시험결과, 마셜안정도 시험의 경우, 장비차이로 인한 오차가 평균 5.1%, 간접인장강도시험의 경우 평균 0.5%, 변형강도시험의 경우 평균 6.5% 발생하는 것으로 나타났다.

추후 본 연구결과를 토대로 더 많은 장비를 통한 Round-Robin Test를 실시하여 각 실험값에 대한 통계분석을 통해 표준시료의 표준에 관한 연구가 계속될 필요가 있으며, 나아가 현재 아스팔트 혼합물 시험들의 역학 특성에 따른 표준시료에 대한 기준값 제시가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 : 19POQW-B152690-01)으로 수행되었으며, 이에 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

Choi, J.S. Development of first generation' IoT platform using IoT measurement sensor device and analysis

- program, 2nd year Research Report on the Development of Raw Material Quality Control Technology for IoT-based Asphalt Plants, Research Report, KICT.
- Choi, J.S., Kim, S.J. and Kim, J.S. (2020). “To reduce the measurement deviation of the marshall stability test urethane standard sample proposal”, Conference of the Korean Society of Civil Engineers.
- Choi, M.J., Kim, H.K., Kim, Y.G. and Lee, J.J. (2017). “Fundamental properties of asphalt concrete mixture as using tdf fly ash as mineral filler”, Korean Society of Civil Engineers, 37(2), pp. 497-505/ April.
- Construction Division of Jeju Special Self-Governing Province (2014). Road damage emergency repair material quality test result.
- Kim, K.W., Kim, S.W., Kwon, O.S. and Doh, Y.S. (2004). “Correlation analysis between rut resistance and deformation strength for superpave mixtures”, Korean Society of Road Engineering, 6(4), pp. 45-53.
- Kim, K.W., Lee, M.S., Kim, J.E. and Choi, S.J. (2002). “A fundamental approach for developing deformation strength based on rutting characteristics of asphalt concrete”, Korean Society of Road Engineering, 4(4), pp. 23-29.
- Korean Intellectual Property Office (KR) (2013). “Environmentally friendly foam-expanded polyurethane form composition considering ductility”, Patent No. 10-2013-0068781.
- KS F 2337 (2017). Standard test method for marshall stability and flow of asphalt mixtures, Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2376 (2019). Standard test method for determining the resilient modulus of asphalt mixtures using indirect tensile mode, Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2382 (2018). Standard test method for indirect tension of asphalt mixtures, Korean Agency for Technology and Standards.
- Lee, M.H. (2012). A study for the establishment of manufacturing method of soil reference sample for a proficiency test, National Institute of Environmental Research.
- Lee, S.G. (1998). A study on recycling cold-mix emulsified asphalt mixtures, Research Report, Kyung Hee University.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015). Guidelines for the production and construction of asphalt mixtures.
- Park, J.Y., Kim, K.W. and Lee, S.J. (2012). “Applicability of asphalt concrete for railroad base course based on deformation strength change due to compaction temperature”, Korean Asphalt Society, 2(1), pp. 23-29.
- Park, K.H. and Lee, C.G. (2017). “A study on proficiency test sample development for environmental & reliability testing field”, J Koran Soc Qual Manag 2017, 45(3), pp. 447-462.
- Shim, J.P., Jin, J.H., Park, T.S. and Lee, J.S. (2012). “Evaluation on patching materials for asphalt pavement”, Korean Society of Road Engineering, 14(3), pp. 59-67.