반복 융해 수분 처리에 따른 다공성 아스팔트의 동탄성계수 변화

Change in Dynamic Modulus of Porous Asphalt According to Thawing-Cycle Moisture Conditioning

유재원* · Tan Hung Nguyen** · 안재훈***

Yoo, Jaewon*, Nguyen, Tan Hung**, and Ahn, Jaehun***

Abstract

Porous asphalt has been used for permeable pavements to improve the safety of roadways and the effectiveness of storm-water management. As a surface drainage that is frequently exposed to water, it is affected by moisture. In this study, dynamic modulus tests were performed on both unconditioned and moisture-conditioned specimens with air-void contents of 7.7% and 8.3% to investigate the viscoelastic properties. One cycle of the moisture-conditioning procedure included placing the specimens in a water tank at 60 °C for 24 h, and subsequently in a water tank at 25 °C for additional 2 h. The results showed that the specimens with lower air-void content exhibited higher values of dynamic modulus. After one cycle of moisture conditioning, the dynamic modulus of the porous-asphalt mixture overall increased. However, the dynamic modulus was reduced by damage after two conditioning cycles. On the basis of the results of the effect of temperature and load frequency on the dynamic-modulus ratio, we can conclude that the dynamic modulus of porous asphalt is more sensitive to temperature than to frequency.

Key words : Porous Asphalt, Air Void Content, Moisture Conditioning, Dynamic Modulus, Dynamic Modulus Ratio

요 지

다공성 아스팔트는 투수성이 높기 때문에, 도로의 안전성 향상 및 우수 관리에 효과적이다. 하지만 표면 배수층으로 물에 자주 노출되기 때문에 수분에 의한 영향을 받는다. 본 연구에서는 공극율이 7.7%, 8.3%인 다공성 아스팔트 혼합물의 건조 및 수분 처리 과정을 실시하고, 동탄성계수 시험을 수행하였다. 각 1회의 수분 처리 과정은 60 °C의 항온수조에 24 시간 수침 후 25 °C의 다른 항온수조에서 추가로 2 시간 수침하였다. 기존의 연구결과와 비교하였을 때, 다공성 아스팔트 혼합물의 낮은 공극율에서 동탄성계수는 더 높게 나타났고, 1회의 수분 처리 과정 후 동탄성계수는 전체적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 하지만 2회의 수분 처리 과정 후에는 다공성 아스팔트 혼합물에서 손상이 발생하여 오히려 감소하였다. 동탄성계수 비를 이용하여 온도 및 하중재하 주기에 대한 영향을 분석한 결과, 다공성 아스팔트의 동탄성계수는 하중재하 주기보다 온도 변화에 따라 더 민감하게 나타났다.

핵심용어 : 다공성 아스팔트, 공극율, 수분 처리, 동탄성계수, 동탄성계수 비

1. 서 론

아스팔트 혼합물에 대한 강도 및 성능을 예측하기 위해 일반적으로 동탄성계수(Dynamic Modulus)를 사용한다. 동

탄성계수는 아스팔트 콘크리트 재료의 강도 및 점탄성을 측정하며 연성포장(Flexible Pavement)의 구조 설계에 이용되고, 동탄성계수의 주곡선(Master Curve)은 역학적 경험 설계 시 중요한 입력 파라미터가 된다. 아스팔트 혼합물의 동탄성

*정회원, 부산대학교 생산기술연구소 연구교수(E-mail: yoojaewon@pusan.ac.kr)

Member, Research Professor, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University

**부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정(E-mail: nthung010189@gmail.com)

Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

***교신저자, 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수(Tel: +82-51-510-7627. Fax: +82-51-513-9596. E-mail: jahn@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

계수는 수분에 민감하므로 National Cooperative Highway Research Program (Solaimanian et al., 2007)에서는 수분의 영향에 따라 아스팔트의 손상 정도를 평가하였다. 수분이 아스팔트 혼합물에 미치는 영향에 대해서 동탄성계수를 이용하여 비교·분석하면 여러 가지 장점이 있다. 먼저, 동탄성계수는 아스팔트 혼합물의 피로균열과 영구변형 예측모델 구성에 필수적인 입력 파라미터로, 온도 및 하중 재하 주기에 따라 변하는 아스팔트 혼합물의 역학적 특성을 효과적으로 고려할 수 있다(Lim et al., 2014). 그리고 동탄성계수는 설계 시 적용되는 입력 파라미터로 수분의 영향에 의한 동탄성계수 값이 설계에 직접 반영될 수 있으며, 동탄성계수 시험은 비파괴시험으로 각각의 독립된 시험 공시체에서 수분의 영향 의한 손상 유·무를 측정할 수 있다. 또한, 동탄성계수는 정적하중 보다 실제 교통하중 조건을 더 잘 모사하는 동적하중의 결과이다(Nadkarni et al., 2009).

아스팔트 혼합물의 수분 처리(Moisture conditioning) 과정에 따른 효과를 평가하기 위해서 다음과 같이 동탄성계수 시험을 이용한 연구가 수행되었다. Zhang et al. (2016)은 버지니아 교통국(Virginia Department of Transportation)과 오클라호마 교통국(Oklahoma Department of Transportation)에 의해 설계된 두 가지의 대표적인 다공성 아스팔트(Porous Asphalt) 혼합물의 거동을 관찰하였다. 이 두 기관에서 제조된 아스팔트 혼합물 공시체의 공극율은 버지니아 교통국에서 20%, 25%, 28%, 오클라호마 교통국에서 20%, 23%, 28%로 서로 다른 공극율을 갖는 것으로 조사되었고, 25 °C에서의 동탄성계수를 비교·분석한 결과, 공극율이 증가함에 따라 동탄성계수는 감소하는 경향을 나타내었다.

El-Hakim and Tighe (2014)는 기존 혼합물로 제작된 세 종류의 공시체와 아스팔트 함량을 최적값 보다 0.8% 증가시켜 제작한 다른 한 종류의 공시체를 건조, 동결-융해의 수분 처리를 실시하였다. 그 결과, 기존 혼합물을 사용한 경우 저온에서의 동탄성계수는 현저하게 감소하였으나, 아스팔트 함량을 0.8% 증가시킨 경우에는 감소 폭이 상당히 줄어드는 경향을 나타내었다. 이 결과로부터 아스팔트 함량이 증가하면 수분으로 인한 아스팔트 재료의 손상을 줄일 수 있는 것으로 분석하였다.

Lee et al. (2016)은 해동 시의 고밀도 가열 아스팔트(Hot Mix Asphalt), 쇄석 아스팔트(Stone Matrix Asphalt) 및 다공성 아스팔트 혼합물의 거동을 조사하였다. 결과를 보면, 수분 처리 과정 후 가열 아스팔트 혼합물은 동탄성계수가 크게 감소하였으나, 쇄석 아스팔트 및 다공성 아스팔트 혼합물은 오히려 약간 증가한 것으로 나타났다. 그리고 수분에 대한 내성은 다공성 아스팔트 혼합물의 아스팔트 바인더 PG82-22에 의해 증가함을 확인하였다.

수분 처리 과정 후 강성 유지율을 나타내는 동탄성계수

비(Dynamic Modulus Ratio)는 인장강도 비(Tensile Strength Ratio)에 대한 대체 지표로 사용되고 있다. Nadkarni et al. (2009)는 밀입도(Dense-Graded), 세립도(Gap-Graded), 개립도(Open-Graded) 혼합물들의 수분 손상에 의한 저항성을 연구하였다. 그 결과, 동탄성계수 비는 수분 처리 과정 후 모든 혼합물에서 감소하는 것으로 나타났고, 특히 개립도 혼합물에서 동탄성계수가 가장 크게 감소하였다.

Badeli et al. (2018)은 다양한 조건에서의 수분 처리 과정으로 인한 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 비를 분석하고자 시험을 실시하였다. 공극율 2.0%, 3.5%, 7.0%로 공시체를 제작하였고, 수분 처리 과정 전·후의 동탄성계수를 측정하였다. 그 결과, 모든 혼합물의 강도는 고온에서 포화 후에 증가한 것으로 나타났다. 그리고 150 회의 수분 처리 과정 후, 모든 혼합물의 동탄성계수 비는 고온이고 낮은 하중재하 주기 조건일수록 감소하였으며, 300 회의 수분 처리 과정 후에는 모든 혼합물은 Stripping 문제로 인해 동탄성계수 비가 현저하게 감소한 것으로 나타났다. 또한 혼합물의 공극율이 증가함에 따라 동결-융해 수분처리 과정으로 인한 손상은 더 증가하였다.

일반적으로 수분은 아스팔트 재료의 성능에 상당한 영향을 미치며 포장 시 발생하는 문제의 주요 원인 중 하나이다. 동탄성계수 시험은 하나의 공시체에서 수분 손상에 의한 아스팔트 재료의 점탄성 특성을 평가할 수 있다. 다공성 아스팔트는 투수성 포장의 재료로서 기존의 불투수성 포장 재료와 달리 포장을 통해 하부 골재층 또는 토양으로의 우수 침투가 용이하다. 하지만 다공성 아스팔트 표면의 우수가 포장체 내로 침투하고 공극에 저장되기도 하므로 수분에 지속적으로 노출된다. 이에 따라 투수성 포장의 표면층으로 사용되는 다공성 아스팔트 재료는 수분에 의해 발생하는 문제점과 수분 손상에 대한 저항성을 고려하여야 하고, 더 많은 주의를 기울여야 한다. 따라서 본 연구에서는 동탄성계수 시험을 이용하여 다공성 아스팔트 혼합물의 수분에 의한 영향을 분석하고자 한다. 시험은 먼저, 건조 조건의 공시체에서 온도 변화 및 하중재하 주기를 다르게 하여 동탄성계수 시험을 실시하고 일정한 횟수의 수분 처리 과정 후, 동일 조건에서의 동탄성계수 시험을 재실행하였다. 그리고 건조 조건 시의 동탄성계수 결과를 기준으로 동탄성계수 비를 비교·분석하였다.

2. 동탄성계수 시험

2.1 다공성 아스팔트 공시체

다공성 아스팔트 혼합물은 종종 개립도의 골재로 만들어 지므로 기존의 아스팔트 재료보다 더 많은 공극을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 각각 공극율이 7.7% (PA7.7), 8.3% (PA8.3)인 다공성 아스팔트 공시체를 KS F 2349 (2010)에 따라 설계·제작하였다. 다공성 아스팔트에 사용된 아스팔트

바인더는 일반적으로 국내에서 많이 사용되고 있는 PG82-34 (SK Asphalt, 2018)이다. 본 연구에 사용된 아스팔트 바인더의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties Asphalt Binder PG82-34 (SK asphalt, 2018)

Test	Value	Unit
Viscosity (135 °C)	3.4	Pa.s
$G^*/\sin\delta$ (Original) (82 °C)	1.27	kPa
$G^*/\sin\delta$ (After RTFO) (82 °C)	2.49	kPa
$G^*\times\sin\delta$ (After PAV) (28 °C)	564	kPa
Flash Point	342	°C
Stiffness (−24 °C)	194	MPa
m-value (−24 °C)	0.32	°C

PA7.7과 PA8.3의 공시체 제작에 사용된 재료는 동일한 채석장에서 수집된 골재를 이용하였고, 이 골재의 최대입경은 10 mm이며, 입도분포는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Grain-size Distribution Curve of Aggregate

KS F 2489 (2015) 및 KS F 2492 (2017)에 따라 다공성 아스팔트 혼합물에 대해 드레인다운 시험과 칸타브로 시험을 실시하였다. 시험결과, PA7.7, PA8.3의 최대 이론적 비중 (G_{mm}) 값은 각각 2.434, 2.445이고, 칸타브로 손실율은 −20 °C에서 17.56%이고, 20 °C에서 2.84%이다. 본 시험에서 사용된 다공성 아스팔트 혼합물의 특성을 Table 2와 같이 정리하였고, 공극율에 따른 시험 공시체는 Fig. 2와 같다.

Table 2. Properties of PA7.7 and PA8.3

Mixture	PA7.7	PA8.3
Air void content (%)	7.7	8.3
Asphalt content (%)	6.0	
Draindown (%)	0.13	
Cantabro Loss (%)	−20 °C	17.56
	20 °C	2.84

Fig. 2. Specimen: (a) PA7.7; (b) PA8.3

2.2 시험장치

시험장치는 Fig. 3(a)과 같이 MTS Landmark® Testing Solutions (MTS Systems Corporation, 2019) 371.10 Servo-Hydraulic Testing System을 이용하여 실시하였고, 이 장비는 100 kN의 하중 프레임에 150 mm의 Stroke Actuator와 25 kN의 Load cell을 포함하고 있으며, Actuator는 축방향 하중을 주기적으로 작용시킬 수 있다. 본 연구에서는 온도 챔버를 MTS장치에 조립하여 동탄성계수 시험 시 일정한 온도를 유지하였다. 그리고 동탄성계수 시험 장비 내부는 변형률 측정을 위한 100 mm 길이의 LVDT 2 개, 하중재하를 위한 직경 100 mm의 상·하부 원형 헤드로 구성되어 있다. Fig. 3(b)는 동탄성계수 시험을 위해 온도 챔버 내부에 공시체를 설치하고 LVDT를 장착한 모습이다.

Fig. 3. Equipment and Specimen: (a) MTS system with temperature chamber; (b) Specimen setup

2.3 시험방법

시험은 제작된 공시체를 온도 챔버 내부의 상·하부 원형 헤드 사이에 설치하고, 테프론 용지를 삽입하여 마찰을 최소화하였다. 동탄성계수 시험에서는 총 5 개의 온도 −10 °C, 4 °C, 21 °C, 37 °C, 54 °C와 온도별 하중재하 주기 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz, 0.1Hz를 적용하여 실시하였다. 하지만 시험 시 54 °C에서 LVDT Support가 불안정한 결과를

나타내어 분석 시에는 54 °C의 결과는 포함하지 않았다. 각각의 시험 시 AASHTO T342 (2011)에 의한 방법으로 온도 챔버에서 공시체의 온도가 평형이 되도록 하였고, 허용 오차는 0.3 °C가 되도록 유지하였으며, 동탄성계수 시험 시의 온도의 범위는 최저온도 -10 °C에서 시작하여 최고온도 37 °C 까지이다. 축방향의 정현파 응력의 크기는 변형률이 $50 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$ 으로 유지되게 하였고, 하중재하 주기는 최고 25 Hz에서 최저 0.1 Hz까지 적용되었으며, 수직변형은 100 mm 길이의 LVDT 2 개를 이용하여 측정하였다. 하중 및 변형값은 사이클 당 최소 50 회를 측정할 수 있도록 데이터 수집 프로그램에서 설정하였다.

동일한 공시체에 대해서 건조상태, 각각 1회, 2회 수분 처리 과정 후의 동탄성계수 시험을 실시하였다. 수분 처리 과정은 AASHTO T283 (2008)의 조건과 동일한 방법으로 진행하였으나, 동결 과정은 실시하지 않았다. 공시체를 수온 60 °C의 항온수조에 24 시간 동안 수침 후, 수온 25 °C의 다른 항온수조에서 추가로 2 시간 동안 수침하였고, 이 과정에서 발생하는 수압의 영향을 최소화하기 위해 수위는 일정하게 유지하였으며, 최종적으로 25 °C의 온도 챔버에서 16 시간 동안 건조하였다. 건조 완료 후에는 온도 변화로 인한 영향을 최소화하고자 즉시 동탄성계수 시험을 실시하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 동탄성계수

시험결과로부터 동탄성계수의 특성을 파악하기 위하여 주곡선을 작성하였다. 주곡선은 시간-온도 중첩의 원리 (Time-Temperature Superposition Principle)를 적용하여 다공성 아스팔트의 특성인 온도와 시간에 대해서 전이시켜 다양한 하중재하 주기에 대한 동탄성계수의 특성을 확인할 수 있다. 여러 온도에서 측정된 동탄성계수를 하중재하 주기 축을 따라 수평방향으로 이동시켜 Fig. 4와 같이 주곡선을 작성할 수 있고, 이때 기준 온도에서의 전이함수(Shift Factor)에 의해 전이시킨 하중재하 주기를 수축주파수(Reducd Frequency)라고 한다. 동탄성계수의 주곡선을 선정하기 위해 사용된 기준 온도는 21 °C이고, 계산은 Olidis and Hein (2004)의 제안식인 Eqs. (1) and (2)를 이용하였다.

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log \omega_r)}} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{\omega_r}{a(T)} \quad (2)$$

여기서, E^* 는 동탄성 계수; δ 는 동탄성계수의 최소값 (Minimum Modulus); α 는 동탄성계수의 최대값(Range of Possible Value); β , γ 는 Sigmoidal Function의 형상함수

(Shape Parameter); ω 는 주어진 온도에서의 하중재하 주기; ω_r 는 기준 온도에서 하중재하 시의 수축주파수; $a(T)$ 는 온도의 함수로서 전이함수이고, T 는 온도이다.

Fig. 4. Master Curve Method and Shift Factor

수분 처리를 하지 않은 공시체의 동탄성계수 결과를 최대 입경 및 아스팔트 함유율이 비슷한 Goh and You (2011), Islam et al. (2018)의 기존 연구 결과와 비교하여 Fig. 5와 같이 나타내었고, 사용된 다공성 아스팔트 혼합물의 특성을 Table 3과 같이 정리하였다. 주곡선을 작성하기 위해 사용되는 전이함수는 Fig. 6과 같다.

Fig. 5. Dynamic Modulus Master Curves of Unconditioned Specimens in (a) semi-log scale; (b) log-log scale (Reference temperature 21 °C)

Table 3. Properties of Porous Asphalt (after Goh and You, 2011; Islam et al., 2018)

Mixture	Goh and You 2011	Islam et al., 2018
Binder	58-34	70-28
Nominal maximum aggregate size (mm)	10.0	9.5
Asphalt content (%)	5.75	5.0
Air void content (%)	20.8	13.6

Fig. 6. Shift Factors for (a) PA7.7; and (b) PA8.3

본 연구에서 실시한 동탄성계수 시험결과를 기존 연구 결과와 비교하였을 때, 공극율이 낮은 PA7.7과 PA8.3에서 동탄성계수가 더 크게 나타났고, 이는 Zhang et al. (2016)의 공극율이 낮을수록 동탄성계수는 더 크게 나타나는 연구결과와 비슷한 경향을 나타냈다.

3.2 Moisture conditioning의 효과

건조 상태 및 각각 1회, 2회 수분 처리 과정 후의 PA7.7과 PA8.3의 동탄성계수 결과를 평균하여 Fig. 7과 같이 주곡선으로 나타내었다. 결과를 보면 1회의 수분 처리 과정 후 다공성 아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 수분 처리 과정 후, 전체적으로 증가하는 경향이 나타났고, 특히 저온에서 그 차이는 더 크게 나타났다. 이는 수분 처리 후 강성이 증가하는 Badeli et al. (2018)과 Lee et al. (2016)의 연구결과

와 유사한 경향을 나타내었고, 이들의 연구 결과에서는 동탄성계수의 증가 이유에 대해서 공극안의 간극수에 의한 것으로 분석하였다. 하지만 2회 수분 처리 과정 후의 동탄성계수는 1회에 비해 오히려 감소하는 경향이 나타났다. 이는 초기 수분 처리 과정에서 폐쇄 공극안에 갇힌 간극수의 영향으로 인해 동탄성계수가 일시적으로 증가하는 경향을 나타냈지만, 반복된 수분 처리 과정 및 하중재하에 의해 갇힌 간극수는 오히려 팽창하여 다공성 아스팔트 혼합물을 손상시키는 것으로 분석된다.

Fig. 7. Dynamic Modulus Master Curves of Unconditioned and Conditioned Specimens (a) semi-log scale; (b) log-log scale.

동탄성계수 비는 Eq. (3)을 이용하여 산정하였다.

$$DMR = \frac{E_{condition}}{E_{uncondition}} \quad (3)$$

여기서, $E_{condition}$ 은 건조 상태에서의 동탄성계수이고, $E_{uncondition}$ 은 수분 처리 과정 후의 동탄성계수이다. 온도 및 하중재하 주기 변화에 따른 동탄성계수 비의 결과를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 동탄성계수 비를 이용하여 온도 및 하중재하 주기에 대한 영향을 분석한 결과, 다공성 아스팔트의 동탄성계수는 하중재하 주기보다 온도 변화에 따라 더 민감하게 나타났지만, 온도에 따른 동탄성계수의 변화 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았다.

Fig. 8. Dynamic Modulus Ratio: (a) after 1st cycle conditioning; (b) after 2nd cycle conditioning

4. 결 론

본 연구에서는 공극율이 7.7%, 8.3%인 다공성 아스팔트 혼합물의 건조 상태 및 수분 처리 과정 후 동탄성계수 변화를 분석하고자 시험을 실시하였다.

기존의 연구결과와 비교하여 다공성 아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 낮은 공극율에서 더 높게 나타났고, 수분 처리 과정 후 다공성 아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 폐쇄된 공극안의 간극수에 의해 전체적으로 증가하는 경향을 나타내었으나, 반복된 수분 처리 과정 및 하중재하에 의해 간극수는 오히려 팽창하여 다공성 아스팔트 혼합물을 손상시켰다. 따라서 다공성 아스팔트 혼합물은 수분의 영향에 의해 발생하는 문제점과 수분 손상에 대한 저항성을 고려하여야 하고, 더 많은 주의를 기울여야 한다.

동탄성계수 비를 이용하여 온도 및 하중재하 주기에 대한 영향을 분석한 결과, 동탄성계수는 온도 변화에 따라 더 민감하게 나타났지만, 동탄성계수 변화 경향은 명확하지 않았다.

본 연구에서는 다공성 아스팔트 혼합물의 수분에 대한 영향을 확인하였다. 하지만 다공성 아스팔트 혼합물의 수분에 대한 영향을 직접 설계에 적용하기 위해서는 다양한 조건에서의 추가적인 연구가 더 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구

비지원(19CTAP-C152124-01)에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- AASHTO T283. (2008). *Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA.
- AASHTO T342. (2011). *Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA.
- Badeli, S., Carter, A., and Doré, G. (2018). Effect of laboratory compaction on the viscoelastic characteristics of an asphalt mix before and after rapid freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 146, pp. 98-109.
- El-Hakim, M., and Tighe, S. (2014). Impact of freeze-thaw cycles on mechanical properties of asphalt mixes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2444, No. 1, pp. 20-27.
- Goh, S.W., and You, Z. (2011). Mechanical properties of porous asphalt pavement materials with warm mix asphalt and RAP. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 138, Issue 1, pp. 90-97. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000307
- Islam, Md.R., Rahman, A.A., and Tarefder, R.A. (2018). Open graded friction course in resisting low-temperature transverse cracking in asphalt pavement. *J. Cold Reg. Eng., ASCE*, Vol. 32, Issue 2, 04018006. doi:10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000164
- KS F 2349. (2010). *Hot mix asphalt mixtures*. Korean Standards Association, Seoul, Korea (in Korean)
- KS F 2489. (2015). *Standard test method for determination of draindown in uncompacted asphalt mixtures*. Korean Standards Association, Seoul, Korea (in Korean).
- KS F 2492. (2017). *Standard test method of cantabro test for porous asphalt mixtures*. Korean Standards Association, Seoul, Korea (in Korean).
- Lee, J., Moon, S.-J., Im, J., and Yang, S. (2016). Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using dynamic modulus. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 45, No. 4, pp. 1280-1288.

- Lim, Y., Lee, S., Lee, J., and Lee, B. (2014). Application of a simple non destructive test method to obtain the dynamic modulus of asphalt mixtures used for an asphalt trackbed foundation. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 17, No. 2, pp. 114-122.
- MTS System Corporation. (2019). *MTS Landmark® Testing Solutions*. Retrieved from https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev_004324.pdf
- Nadkarni, A., Kaloush, K., Zeiada, W., Biligiri, K. (2009). Using dynamic modulus test to evaluate moisture susceptibility of asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2127, No. 1, pp. 29-35.
- Solaimanian, M., Bonaquist, R.F., and Tandon, V. (2007). *Improved conditioning and testing procedures for HMA moisture susceptibility*. NCHRP Report 589, Transportation Research Board, Washington DC, USA.
- Olidis, C., and Hein, D. (2004). Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. *Proceedings of the 2004 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Québec City, QC, Canada.
- SK Asphalt. (2018). *PG82-34*. Retrieved from http://www.skasphalt.com/ap_data/ap_data_view.asp?idx=169&code=2
- Zhang, Y., Wang, L., and Diefenderfer, B.K. (2016). Evaluation of moisture susceptibility of high-porosity ATPB drainage layer materials using modified dynamic modulus test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 28, No. 10, 04016091. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001597

Received	October 4, 2019
Revised	October 8, 2019
Accepted	October 21, 2019