Int. J. Highw. Eng. Vol. 19 No. 5 : 131-141 OCTOBER 2017
https://doi.org/10.7855/IJHE.2017.19.5.131

몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물의 역학적 물성 평가 연구

Evaluation on Mechanical Properties of Polymer-Modified Warm-Mix Asphalt Mixtures for Monsoon Climate Regions

이 강 훈 Lee, Kanghun | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 신진연구원 · 교신저자 (E-mail : kh83lee@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The main distress of asphalt pavements in monsoon climate regions are caused by water damage and plastic deformation due to repeated rain season and increased heavy vehicle traffic volume. In this study, the mechanical properties of polymer-modified warm mix asphalt (PWMA) materials are evaluated to use in monsoon climate regions such as Indonesia.

METHODS : Comprehensive laboratory tests are conducted to evaluate moisture resistance and permanent deformation resistance for three different asphalt mixtures such as the Indonesian conventional hot-mix asphalt (HMA) mixture, the polymer-modified asphalt mixture, and the polymer-modified warm mix asphalt (PWMA) mixture. Dynamic immersion test and indirect tensile strength ratio test are performed to evaluate moisture resistance. The wheel tracking test is performed to evaluate rutting resistance. Additionally, the Hamburg wheel tracking test is performed to evaluate rutting and moisture resistances simultaneously.

RESULTS : The dynamic immersion test results indicate that the PWMA mixture shows the highest resistance to moisture. The indirect tensile strength ratio test indicates that TSR values of PWMA mixture, Indonesian PMA mixture, and Indonesian HMA mixture show 87.2%, 84.1%, and 67.9%, respectively. The wheel tracking test results indicate that the PWMA mixture is found to be more resistant to plastic deformation than the Indonesian PMA. The dynamic stability values are 2,739 times/mm and 3,150 times/mm, respectively. Moreover, the Hamburg wheel tracking test results indicate that PWMA mixture is more resistant to plastic deformation than Indonesian PMA and HMA mixtures.

CONCLUSIONS : Based on limited laboratory test results, it is concluded that rutting resistance and moisture susceptibility of the PWMA mixture is superior to Indonesian HMA and Indonesian PMA mixtures. It is postulated that PWMA mixture would be suitable for climate and traffic conditions in Indonesia.

Keywords
Polymer modified warm mix asphalt, Monsoon Climate, Moisture resistance, Plastic deformation resistance

Corresponding Author : Lee, Kanghun, Research Specialist
Highway and Transportation Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Techonlogy, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.910.0026 Fax : +82.31.910.0161
E-mail : kh83lee@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Sep. 01, 2017 Revised Sep. 20, 2017 Accepted Sep. 20, 2017

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

최근 전 세계적인 지구온난화와 이상기온 현상 등으로 환경문제에 대한 관심이 고조되면서 기후변화 대응에 대한 관심은 전 세계적으로 증가하고 있다. 이에 기후변화에 대하여 1970년대부터 과학적인 검증을 시작

하여 1980년대에 기후변화에 대한 사실을 인정하게 되었고, 1992년 리우회의에서 유엔기후변화협약(UNFCCC)을 채택하게 되었다. 1997년 교토에서는 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP3; Third Session of the Conference of Parties to the UNFCCC)를 통하여 교토의정서를 채택하고, 2012년까지 1990년의 이산화탄소 배출량을 5.2%까지 저감하는 것을 합의하였다. 그리고 교토의정서는 효율적으로 이산화탄소를 감축시키기 위해 배출권거래제, 공동이행제도와 청정개발체제를 도입했다. 이 중 배출권거래제는 유럽을 중심으로 활발히 진행되고 있으며 연간 1조원 이상의 거래가 이루어지고 있다. 즉, 에너지 소비를 줄임으로써 경제적 효과도 얻을 수 있게 된 것이다. 또한 2015년 12월에는 미국과 중국을 포함하여 총 195개 국가에서 파리기후변화협약을 체결하고, 산업화 이전 시기 대비 지구 평균 기온 상승폭을 2도보다 낮은 수준으로 유지하기 위한 노력을 지속적으로 추진하고 있다.

이러한 세계적 이슈에 대응하기 위하여 도로포장 산업부문에서는 친환경 도로포장 건설공법으로 중온 아스팔트(Warm-Mix Asphalt, WMA)기술을 개발하여 유럽 및 미국 등의 선진 국가에서 도로건설 현장에 적용되고 있으며, 현재, 전 세계적으로 약 30종류 이상의 중온 아스팔트 기술이 개발되어 상용화되어 있다(Lee et al., 2013).

한편, 인도네시아, 베트남, 캄보디아 등 개발도상국은 지역 간에 경제교류 활성화 및 국민 삶의 질을 높이기 위해 기초 기반시설인 도로 건설에 많은 예산을 투자하고 있다.

대표적으로 인도네시아는 2014년 기준으로 약 496,607km의 도로망(포장율 59%)을 가지고 있으며 이 중 고속도로는 2014년 기준 784km이나 향후 15년 동안 고속도로를 4,610km를 확장하여 2028년에는 총 5,380km를 운용할 계획을 가지고 있다. 또한 인도네시아 자동차 등록대수 전체 7,100만 대 중 82%가 수마트라, 자바, 발리지역에 밀집되어 있으며, 이로 인해 극심한 교통 체증 현상이 발생하고 있으며, 도로망의 확충은 인도네시아 경제 발전을 위한 최우선 과제로 인식되고 있다(해외건설종합서비스, http://www.icak.or.kr/).

하지만 이러한 도로망 확충계획에도 불구하고, 인도네시아와 같은 개발도상국의 경우, 경제성장에 따른 급격한 차량 증가 및 낮은 도로포장 기술로 인하여 도로포장이 공용수명에 이르지 못하고 조기에 파손이 발생하는 일이 빈번하게 발생하고 있는 실정이다.

특히, 인도네시아의 경우에는 전체 도로에서 약 96%가 아스팔트 포장으로 시공되어 있으며, 년 중 약 6개월 동안 비가 내리는 우기를 가지는 기후적인 특성과 과적차량 및 교통량의 증가로 인하여 소성변형과 포트홀, 골재박리와 같은 조기 파손이 발생하고 있다. 또한, 인도네시아의 아스팔트 플랜트가 인도네시아 전역에 고르게 분포되어 있지 않아 원거리 공사의 경우 아스팔트 혼합물의 포설 및 시공온도를 관리하는데 어려움이 있으며, 부적합한 온도에서 시공한 아스팔트 포장의 경우 다짐도 확보 미흡으로 인하여 조기파손으로 이어지는 악순환이 계속 반복되고 있다. 이러한 도로포장의 파손은 인도네시아와 같은 몬순기후 지역 국가에서 공통적인 문제이다.

최근 인도네시아 정부에서는 현재의 건설기술을 지속가능하고 친환경적인 건설기술로의 변화를 계획하고 있다. 도로분야에서도 녹색도로 건설을 위한 기술개발을 장려하고 있으며, 특히, 중온 아스팔트 포장, 장수명 포장, 투수성 포장, 저소음 포장 등이 이에 해당된다.

이러한 몬순기후 국가의 도로포장의 문제와 친환경 도로포장 기술 수요에 따라, 2014년에 한국과 인도네시아는 공동으로 중온 개질 아스팔트 포장 기술을 개발하였다(한국건설기술연구원, 2014). 본 연구에서는 한국과 인도네시아가 공동으로 개발한 중온 개질 아스팔트 포장 기술에 대한 혼합물 성능평가를 수행하였으며, 이를 통해 중온 개질 아스팔트 포장 기술이 몬순기후 국가에 적합한지 제시하고자 한다.

2. 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 기술 개념

일반적으로 중온 아스팔트 기술은 전세계적으로 친환경 포장 공법으로 알려져 있으며, 일반 가열 아스팔트 기술보다 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공온도를 약 30℃ 낮추어 에너지 절감 및 유해가스 배출을 감소시킬 수 있고, 이를 통해 골재를 가열하는 연료비용 절감, 아스팔트 혼합물의 생산 시 발생하는 연무와 유해가스 발생량 저감, 추운지역에서 아스팔트 포장의 다짐도 확보, 아스팔트 포장 시공 완료 후 교통 조기 개방의 장점을 가지는 기술이다.

한편, 개질 아스팔트 기술은 일반 아스팔트보다 고온 및 저온의 유변학적 성능을 향상시켜 줌으로써 아스팔트 포장에서 발생하는 고온에서 소성변형저항성, 저온에서 온도균열 저항성, 차량의 반복하중에 의한 피로균열 저항성, Top-down 균열 저항성을 개선시켜 아스팔

트 포장의 공용수명을 증가시켜 준다. 일반적으로 개질 아스팔트는 폴리머 개질제와 함께 사용하므로 아스팔트의 점도가 높아지며, 개질 아스팔트 혼합물의 작업성을 확보하기 위해서는 아스팔트 혼합물의 생산온도가 170℃~190℃이고 시공온도는 140℃~160℃로 일반 아스팔트 포장보다 높은 온도에서 관리되어야 한다. 만약, 생산 및 시공온도가 낮아지면 개질 아스팔트는 골재를 코팅하는 혼합과정에서 문제가 발생하며, 현장에서도 다짐도를 확보하기 어려워 조기 파손으로 연결될 수 있다(Kim, 2013; 2014). 또한, 개질 아스팔트 혼합물은 생산 및 시공온도를 높게 관리하므로 연료소비량과 유해가스 발생량이 증가하여 경제적 및 환경적인 문제를 야기할 수 있다.

이에 기 연구에서는 개질 아스팔트 기술의 단점을 보완하고 몬순기후 지역에 적합한 친환경 도로포장 기술 개발을 위해 아스팔트 혼합물 생산 및 시공온도를 낮출 수 있는 중온 아스팔트 기술과 소성변형 및 균열에 대한 저항성을 증진시킬 수 있는 개질 아스팔트 기술을 융합하여 중온 개질 아스팔트 포장 기술을 개발하였다(한국건설기술연구원, 2014). Fig. 1은 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 기술의 개념도를 나타낸 것이다.

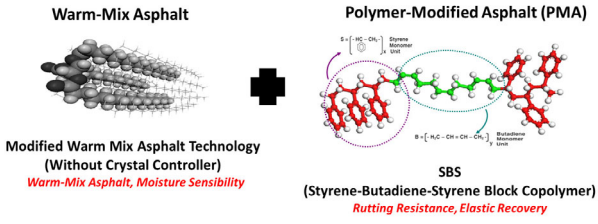


Fig. 1 Concept of Polymer Modified Warm Mix Asphalt Technology for Monsoon Climate Region

3. 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물의 성능 평가

3.1. 실내 실험 개요

인도네시아는 년 중 우기가 길고 고온 다습한 기후로, 중차량 등 과적하중에 의해 포트홀, 표면박리, 소성변형과 같은 포장파손이 빈번히 발생되고 있어 인도네시아에서 아스팔트 포장 재료에서 중요한 성능인자는 수분저항성 및 소성변형저항성이다.

본 연구에서는 개발된 몬순기후형 중온화 개질 첨가제를 혼합한 아스팔트 혼합물과 인도네시아에서 현재 사용하고 있는 인도네시아 일반 아스팔트 혼합물 및 PG 70-22의 개질 아스팔트 혼합물에 대하여 수분 민감도 및 소성변형 저항성에 대한 실내 공용성 시험을 수행하여 성능 평가를 수행하였다.

수분민감도 평가는 다지지 않은 혼합물을 사용하여 아스팔트와 골재 간의 박리저항성을 평가하는 동적수침시험(Dynamic Immersion Test)과 다짐된 혼합물을 사용하여 수분저항성을 평가하는 간접인장강도비(Tensile Strength Ratio) 시험을 각각 수행하였다. 또한, 소성변형 저항성을 평가하기 위하여 휠 트래킹 시험(Wheel Tracking Test)을 수행하였으며, 수분 민감도 및 소성변형 저항성을 동시에 평가할 수 있는 함부르크 휠트래킹 시험을 추가적으로 수행하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 실내 공용성 평가 항목과 평가 분석을 위한 역학적 특성을 정리한 것이다.

Table 1. Laboratory Performance Evaluation Tests and Mechanical Characteristics

Mechanical properties	Standard	Characteristics	Condition of test
Resistance of stripping	BS EN 12697-11 (2003)	Visual evaluation of stripping(%)	25℃, 60rpm, 24hr
Moisture resistance	AASHTO T 283 (2007) KS F 2398 (2012)	TSR, %	25℃
Resistance of moisture damage and permanent deformation	AASHTO T 324 (2011)	Point of stripping, Permanent deformation when loading of 20,000	In 60℃ iwater 705N±4.5N
Resistance of permanent deformation	KS 2374(2010)	DS(cycle/mm) RD	60℃ 4% air void 42pass/min

3.2. 사용 재료

본 연구에서는 인도네시아 도로의 표층에 주로 사용되고 있는 인도네시아 가열 아스팔트(HMA)혼합물과 인도네시아 중차량 교통량이 통행하는 도로의 표층에 사용하고 있는 개질 아스팔트(PMA)혼합물을 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물(PWMA)과 비교·평가하였다.

몬순기후형 중온화 개질 첨가제는 국내에서 보유하고 있는 중온 아스팔트 기술을 인도네시아 기후에 적합하도록 구성 성분을 개선하고 국내 K화학회사가 보유하고 있는 SBS 폴리머 기술을 변형하여 개발한 제품을 사용하였다.

PWMA 첨가제의 주요 성분을 Table 2에 정리하였

다. PWMA 첨가제는 국내 중온 아스팔트 첨가제의 구성 성분 중 결정화 조절제를 제외한 왁스 기반의 중온화 첨가제로 구성되어 있으며 SBS계열의 폴리머를 함께 혼합하여 하나의 첨가제로 제조되었다. 일반적으로 국내 중온화 첨가제에 포함되어 있는 결정화 조절제는 저온에서의 취성 파괴에 대한 저항성 증진을 위해 첨가된 구성 요소로 인도네시아와 같은 고온 다습한 지역에서는 아스팔트 포장 성능에 저온특성이 영향을 미치지 않기 때문에 제외되었으며, 폴리머 및 변형된 중온화 첨가제의 함량은 다수의 실내 실험 및 경제성을 고려하여 최종 선정된 것이다.

Table 2. Component of PWMA

Component	Content	Effect
Polymer (SBS)	3.0% according to asphalt binder content	Improvement of permanent resistance and E/R
Modified warm mix asphalt additive (without crystal controller)	1.5% according to asphalt binder content	Available to mix and compact at warm temperature, Improvement of moisture resistance

3.3. 배합설계

몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물 평가를 위해 실내 배합설계를 실시하였다. 배합설계에서는 몬순기후형 중온화 개질 첨가제 외에 인도네시아에서 수급한 천연황을 함께 사용하였다. 일반적으로 황은 상분리를 억제하고 물성의 향상을 위해 첨가되는 성분으로 알려져 있다(FHWA, 2012). Fig. 2는 배합설계에 사용된 몬순기후형 중온화 개질 첨가제(PWMA) 및 천연황을 나타낸 것이다.

Fig. 2 Polymer Modified Warm Mix Asphalt Additive (PWMA) and Indonesian Natural Sulfur

본 연구에 사용한 골재는 국내 경주에서 수급된 재료로서 골재의 밀도, 편장석율, 마모율 등을 평가하였고 1등급 단입도 골재를 선정하여 배합설계를 수행하였다. 인도네시아에서는 일반적으로 표층에 13mm 배합 아스팔트 혼합물을 사용하기 때문에 합성입도는 인도네시아 표층 아스팔트 혼합물 기준을 만족하는 입도로 선정하였다. 설계입도를 조절하기 위해 세 가지의 골재(19~13.2mm Stock file, 13.2~4.75mm Stock file, Sub 4.75mm Stock file)와 채움재를 사용하였으며, 사용된 골재의 입도는 Fig. 3과 같다.

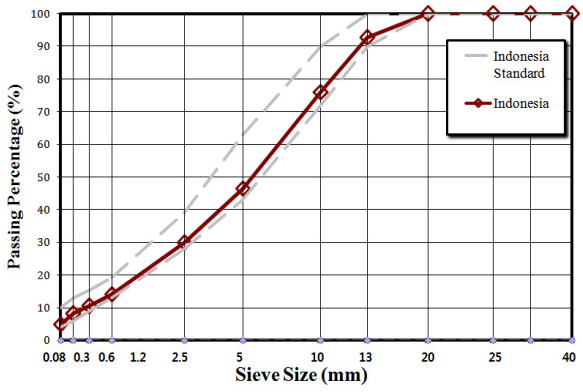


Fig. 3 Gradation for Mix Design

인도네시아 가열 아스팔트 혼합물(HMA), 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물(PMA), 인도네시아형 중온 개질 아스팔트 혼합물(PWMA)은 모두 동일한 입도를 사용하였으며, 배합설계는 Superpave 다짐장비를 사용하여 수행되었다. 사용된 선회 다짐기는 IPC사의 제품으로 공시체에 600kPa 이상의 다짐 압력을 전달할 수 있는 장비이며, 몰드가 회전각 1.25°로 선회하며 분당 30회 회전 속도를 유지하여 공시체를 다진다. 배합설계는 100회 선회다짐하여 공극률 4%를 가지는 아스팔트 함량을 최적 아스팔트 함량으로 결정하였으며, 3종 모두 5.4%로 결정되었다. Table 3은 배합설계 결과를 나타낸 것이다. Table 3에서 나타낸 바와 같이 몬순기후형 중온 개질 아스팔트의 경우, 인도네시아 일반 아스팔트 및 개질 아스팔트보다 약 30~40℃ 낮은 온도에서 혼합 및 다짐이 이루어져 국내에서 개발된 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 첨가제의 중온화 효과를 확인할 수 있었다.

Table 3. Result of Mix design at 4% Air Void

Type	Mixing temp.	Comp. temp.	%AC	%VMA	%VFA
Indonesian HMA	160℃	130℃	5.4	16.48	77.11
Indonesian PMA	175℃	155℃	5.4	15.69	73.76
PWMA	135℃	115℃	5.4	18.02	75.67

3.4. 시험방법

3.4.1. 동적수침시험

본 연구에서는 비다짐 혼합물에 대한 수분민감도 평가로 국내 '아스팔트 콘크리트 포장 시공지침'(국토교통부, 2017)에 수록되어 있고, 비교적 실험 방법이 간단한 동적수침시험을 채택하였다.

동적수침시험은 BS EN126911 'Determination of the affinity between aggregate and bitumen'에 규정되어 있다. 동적수침시험은 골재를 코팅한 아스팔트가 수침상태에서 얼마나 친밀한지를 평가하는 실험방법으로 11.2mm를 통과하고 8mm보다 작은 골재를 사용한다. 규격에 맞는 골재 510±2g의 골재와 아스팔트 바인더 16g을 혼합온도에서 혼합하고 16시간 이상 양생 후, 20~25℃ 환경에서 60rpm으로 규격에 맞는 실험용기에 24시간 롤링 후, 아스팔트 바인더가 골재에 피복되어 있는 상태를 육안으로 평가하는 방법이다. 동적수침시험은 정확한 정량적 평가가 어렵지만 육안으로 아스팔트가 골재를 코팅한 부분의 박리정도를 평가할 수 있다. Fig. 4는 동적수침 시험 규격에 제시된 실험용기 및 시험전경을 보여준다.

Fig. 4 Dynamic Immersion Test

동적수침시험에 사용된 아스팔트는 인도네시아 일반 아스팔트와 개질 아스팔트, 그리고 용해도를 고려하여 PWMA의 과립형 및 펠렛형 두 가지 종류의 몬순기후형 중온 개질 아스팔트로, 총 4가지 종류의 아스팔트에 대해 평가를 수행하였다. 몬순기후형 중온 개질 아스팔트의 교반은 High Shear Mixer를 사용하여 1시간동안 300rpm으로 교반 후, 인도네시아 천연황 0.1% 첨가하여 Normal shear mixer로 30분간 교반하였다.

3.4.2. 간접인장강도비 시험

다짐된 아스팔트 혼합물에 대한 수분 저항성 평가를 위해 인도네시아 일반 아스팔트와 개질 아스팔트, 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물에 대하여 간접인장강도비 시험을 수행하였다.

다짐된 아스팔트 혼합물의 수분 민감성을 측정하기 위한 방법은 여러 종류의 시험방법이 있으나 국제적으로 폭넓게 사용되고 있는 간접인장강도비 시험법인 AASHTO T 283의 규정에 따라 시험을 수행하였다. 배합설계 결과를 바탕으로 결정된 3가지 종류의 아스팔트 혼합물에 대하여 선회 다짐기를 사용하여 공극률 71%가 얻어지도록 다짐을 시행하여 다짐 공시체를 제작하였다. 아스팔트의 종류별로 공시체 3개는 건조 상태, 나머지 3개는 각각 진공 처리 및 수분 처리한 후 간접인장강도 시험을 수행하였다. 건조 시험용 공시체는 시험 전까지 상온에 양생하고, 포일(foil) 등으로 밀봉하여 플라스틱 시료함에 넣어 25℃의 항온 수조에 최대 2시간 동안 양생한 후 간접 인장강도 시험을 수행하였다. 나머지 3개 공시체는 진공 처리 후 60±1℃의 온도로 항온 수조에 24±1시간 동안 양생 후, 시료를 꺼내어 25±1℃의 수조에 2±0.5시간 동안 놓아둔 후 간접 인장강도 시험을 수행하였다. 인장강도비(TSR, Tensile Strength Ratio)는 건조상태와 습윤상태에서 측정한 인장 강도값을 이용하여 다음 Eq. (1)과 같이 계산한다.

$$TSR(\%) = \frac{S_1}{S_0} \times 100 \quad (1)$$

여기에서,

S_0 = 건조 상태의 기준 공시체의 간접인장강도

S_1 = 수분 상태의 조건 처리한 공시체의 간접인장강도

아스팔트 혼합물의 수분손상에 대한 저항성은 TSR 값이 클수록 우수하다고 할 수 있다. Fig. 5는 인장강도 시험 전 수분처리 과정 및 간접인강강도 시험 전경을 보여준다.

Fig. 5 Indirect Shear Strength Ratio Test

3.4.3. 함부르크 휠트래킹 시험

아스팔트 혼합물에 대한 수분민감도를 평가하기 위해 가장 일반적인 시험방법은 AASHTO T-283에 규정된 수정 로트만 시험(Modified Lottman Test)에 의한 간접인장강도비(Tensile Strength Ratio, TSR) 시험이

다. 하지만 최근 간접인장강도비 시험결과가 현장 공용성과 상관관계가 없다는 조사결과가 보고되고 있으며, 이에 따라 미국의 많은 주 교통국에서는 간접인장강도비를 대체할 시험방법을 모색하고 있다. 최근에는 소성변형과 수분민감도를 동시에 측정할 수 있는 함부르크 휠 트래킹 시험(Hamburg Wheel Tracking Test)이 대안으로 제안되고 있다. 함부르크 휠 트래킹 시험은 AASHTO T 324에 규정되어 있으며, 50℃의 고온에 다짐된 공시체를 물에 침수시켜 705±4.5N의 차륜하중을 반복 재하하여 매회 침하량을 측정하는 시험법이다. 일반적으로 미국의 주 교통국에서는 20,000회의 차륜하중을 재하하며, 박리가 발생하는 지점이 최소 10,000회 이후 발생하고 20,000회에서의 침하량이 20mm를 초과하지 않는 아스팔트 혼합물을 사용하도록 규정하고 있다. 수분민감도의 경우, Fig. 7과 같이 함부르크 휠 트래킹 시험 시 침하량 기울기가 급변하는 지점을 박리발생점(Stripping Point)로 규정하며 박리가 발생하는 지점이 늦게 발생할수록 수분민감도가 우수한 아스팔트 혼합물로 평가한다.

Fig. 6 Hamburg Wheel Tracking Test Machine

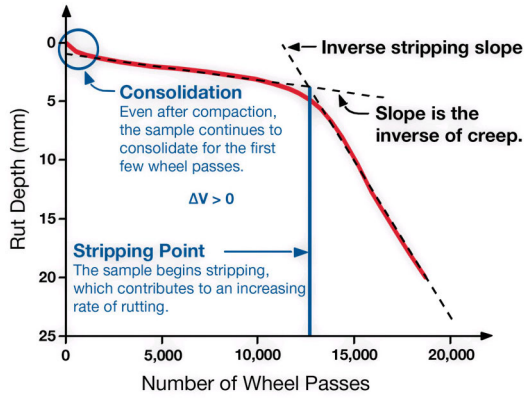


Fig. 7 Analysis of Hamburg Wheel Tracking Test Result

함부르크 휠 트래킹 시험은 AASHTO T 324에 근거하여 시험을 진행하였으며, 실내 배합설계 결과에서 결정된 5.4%의 아스팔트 함량으로 인도네시아 일반 아스팔트 혼합물과 개질 아스팔트 혼합물, 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물을 준비하였다. AASHTO T 324에서는 Fig. 8과 같이 슬래브 시편과 원통형 시편을 모두 사용하도록 규정하고 있으며, 본 연구에서는 높이 60mm, 지름 150mm이고, 공극률 7.0±1.0%로 제작한 원통형 시편의 한쪽 면을 절단하여 사용하였다.

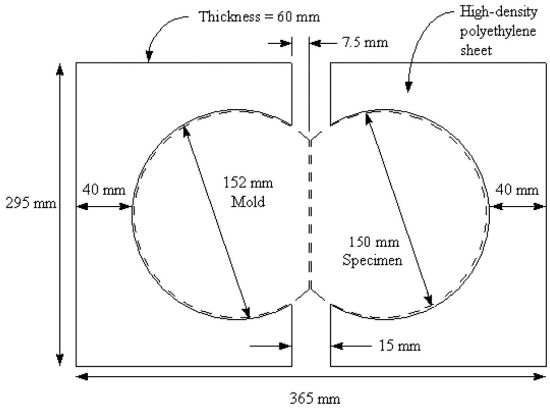


Fig. 8 Cylindrical Specimen for Hamburg Wheel Tracking Test

3.4.4. 휠 트래킹 시험

인도네시아에서 고온 및 중차량으로 인해 아스팔트 포장에서 발생하는 파손 중 가장 흔히 나타나는 결함은 소성변형이다. 일반적으로 아스팔트 포장에서 소성변형은 고온에서 하중이 증가함에 따라 서서히 발생하며, 바퀴가 접촉하는 바닥이 침하되어 종방향으로 골이 패이듯 포장이 손상되는 형태로 나타난다. 이러한 소성변형은 반복되는 윤하중에 의한 아스팔트 혼합물의 압밀로 인한 밀도 증가와 반복되는 차량하중에 의한 아스팔트 혼합물의 전단변형이다. 두 가지 형태에서 소성변형의 차이점은 전자는 포장체가 압밀됨에 따라 체적변화를 수반하는 반면, 후자의 전단변형은 포장체의 체적이 그대로 유지되면서 윤하중에 의해 유발된 전단력에 의해 포장 재료가 횡방향으로 전단파괴 면을 따라 이동하는 것을 의미한다(Ronald et al., 1994).

아스팔트 포장에서 발생하는 소성변형의 주요 원인은 아스팔트 혼합물의 전단변형으로 노상, 보조기층, 기층, 포장층 등 포장체의 모든 층에서 발생될 수 있다. 회전하는 차륜에 의해 재하되는 포장체 내의 응력상태는 매우 복잡하며 실내시험에서 아스팔트 콘크리트의 현장거동에 대한 모사는 거의 불가능하다. 따라서 아스팔트 혼합물의 실내시험은 주로 재료에 대한 상대적 비교를 통하여 포장체의 응력상태를 추정하고 있다.

본 연구에서는 소성변형 저항성을 평가하기 위해 반복주행 하중을 가하는 휠 트래킹 시험을 수행하였다. 이를 위해 305×305×50mm의 슬래브 공시체를 롤러 압축다짐기(Roller Press Compactor)로 공극률 4%의 공시체를 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 상온 양생 후 60℃에 6시간 보관 후 시험에 사용되었다. 시험은 60℃에서 수행되었고, 재하 윤하중은 686kN(70kg), 통과횟수 42회/min로 60분 동안 2,520회 반복주행(시간과 통과횟수)에 따른 침하량을 측정하였다.

동적안정도(Dynamic Stability: DS)는 공시체의 변형이 1mm 발생하는데 통과하는 횟수로 나타내며, 변형속도(Rate of Deformation: RD)는 분당 발생하는 변형량으로 나타낸다. 동적안정도와 변형속도는 다음 Eq. (2), Eq. (3)에 의해 산출할 수 있다.

$$DS = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times c \quad (2)$$

여기에서,

DS = Dynamic Stability

$d_1 = t_1$(일반적으로 45분)에서의 변형량(mm)

$d_2 = t_2$(일반적으로 60분)에서의 변형량(mm)

$c = t_1$보정계수, 1.0

$$RD = \frac{d_{60} - d_{45}}{15} \quad (3)$$

여기에서,

RD = 분당 변형속도(mm/min)

d_{60} = 60분에서의 변형량(mm)

d_{45} = 45분에서의 변형량(mm)

Fig. 9는 휠 트래킹 실험용 슬래브 제작과정과 휠 트래킹 실험 전경을 보여주고 있다.

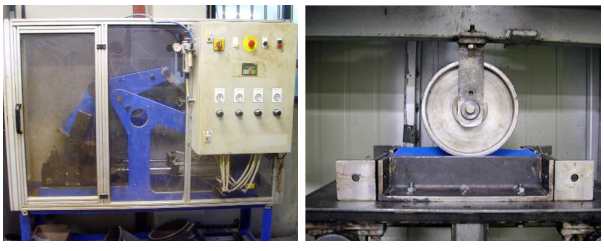


Fig. 9 Wheel Tracking Test

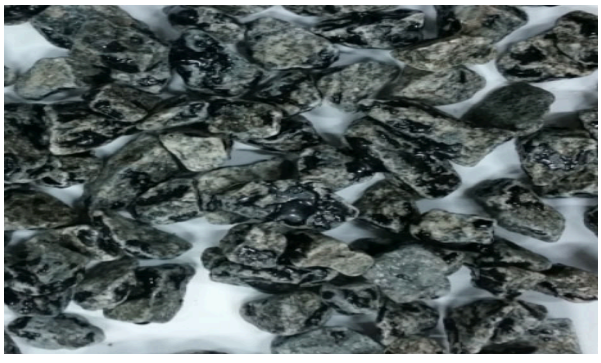
본 연구에서는 실내배합에서 결정된 최적아스팔트 함량인 5.4%를 적용하여 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물과 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물에 대하여 305×305×50mm 규격의 슬래브 공시체를 제작하여 휠 트래킹 시험을 수행하였다. 몬순기후형 중온화 개질 첨가제의 함량은 전체 아스팔트 중량 대비 4.5%를 치환하였으며, 추가적으로 인도네시아 천연황을 아스팔트 함량 대비 0.1% 첨가하였다. 휠트래킹 시험은 분당 42회 2,520회를 왕복시켰으며, 하중은 680kN을 재하하였다.

3.5. 시험결과

3.5.1. 동적수침시험 결과

동적수침시험 결과, PWMA 과립형 첨가제의 경우, 박리방지 저항성이 약 60%로 수분에 대한 저항성이 가장 높은 것으로 나타났으며, PWMA 펠렛형 첨가제를 사용한 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물과 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물이 40%로 수분저항성이 비슷한 것으로 분석되었다. 펠렛형의 경우, 과립형과 구성물 및 베이스 아스팔트가 동일하지만 박리방지 저항성에 차이가 발생한 것은 동일 교반시간 동안 같은 양의 개질제를 교반하였을 때, 개질제의 용해정도의 차이로 인한 결과인 것을 판단된다. 인도네시아 일반 아스팔트 혼합물의 박리방지 저항성이 5%로 인도네시아에서 상용되고 있는 아스팔트는 박리방지 저항성에 대한 개선이 필요한 것으로 분석되었다. Fig. 10은 동적수침 실험 결과를 정리한 것이다.

(a) PWMA (Granule Type)



(b) PWMA (Pellet Type)

〈Figs. Continued〉

(c) Indonesian PMA

(d) Indonesian HMA

Fig. 10 DIT Test Result

3.5.2. 간접인장강도비 시험 결과

Fig. 11은 간접인장강도비 시험결과를 정리한 것이다. 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물의 경우, 인장강도비(TSR)가 87.2%로 수분에 대한 저항성이 우수한 것으로 분석되었다. 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물의 경우, 인장강도비가 84.1%로 비교적 양호한 것으로 분석되었으나 인도네시아 일반 가열 아스팔트 혼합물의 경우, 인장강도비가 67.9%로 수분에 대한 저항성이 낮은 것으로 나타났다. 국내 일반 가열 아스팔트 혼합물의 인장강도비가 75~80%임을 감안할 때, 인도네시아 일반 가열 아스팔트 혼합물은 수분에 대한 저항성이 낮은 것으로 판단된다.

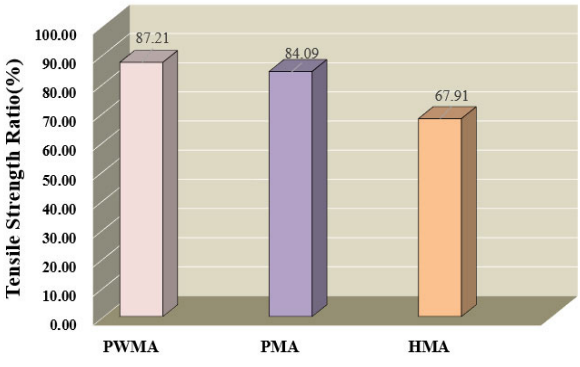
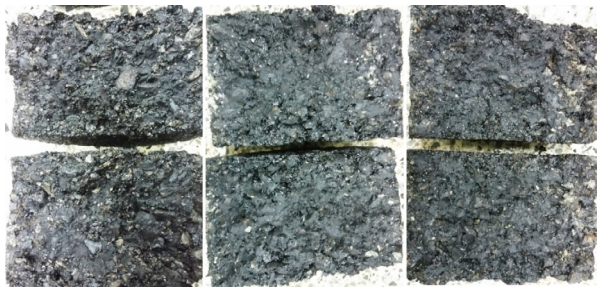


Fig. 11 Indirect Shear Strength Ratio Test Result

Fig. 12는 간접인장강도비 시험 후, 파괴된 공시체의 단면을 육안 관찰한 결과를 보여주고 있다. 인도네시아 가열 아스팔트 혼합물의 공시체 단면에서 볼 수 있듯이 아스팔트가 골재로부터 탈리된 부분이 분명하게 관찰되어 인도네시아 일반 아스팔트 혼합물은 수분에 대한 저항성을 개선시켜야 할 것으로 판단된다.



(A) HMA (B) PMA (C) PWMA

Fig. 12 Cross Section of Specimen After Indirect Shear Strength Test

3.5.3. 함부르크 휠트래킹 시험 결과

Fig. 13은 인도네시아 일반 아스팔트 혼합물과 개질 아스팔트 혼합물, 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물에 대한 함부르크 휠 트래킹 시험 결과로서 차륜 하중의 재하 횟수에 따른 침하량은 나타내 것이다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 인도네시아 가열 아스팔트 혼합물은 차륜 하중이 6,595회 통과 시 20.1mm의 침하가 발생하였으며, 박리발생 점은 5,100회에서 발생하였다. 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물은 함부르크 차륜 하중이 20,000회 통과 시 침하량이 19.1mm 발생하였으며, 박리발생점은 13,100회에서 발생하였다. 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물은 함부르크 차륜 하중이 20,000회 재하 시, 침하량이 14.9mm 발생하여 인도네시아 일반 아스팔트 혼합물과 개질 아스팔트 혼합물보다 소성변형에 대한 저항성이 우수한 것으로 평가되었다. 또한, 박리발생 시점도 15,000회에서 나타나 수분

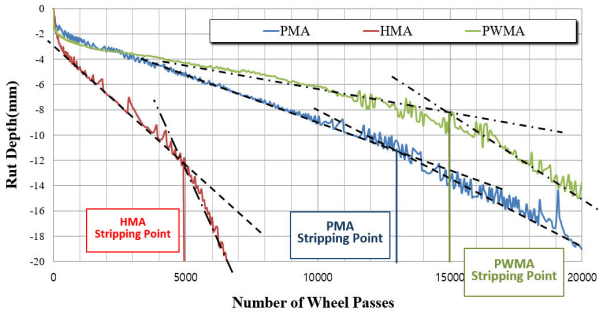
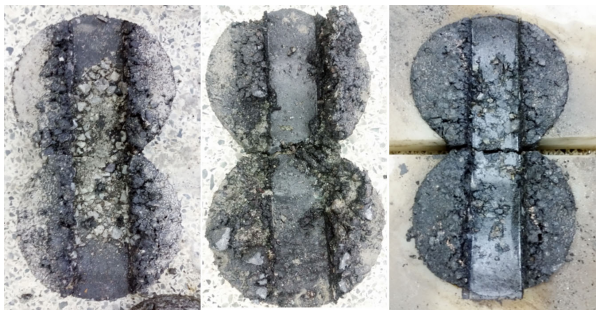


Fig. 13 Test Result of Hamburg Wheel Tracking Test

에 대한 저항성도 인도네시아 일반 아스팔트 혼합물과 개질 아스팔트 혼합물보다 우수한 것으로 평가되었다.

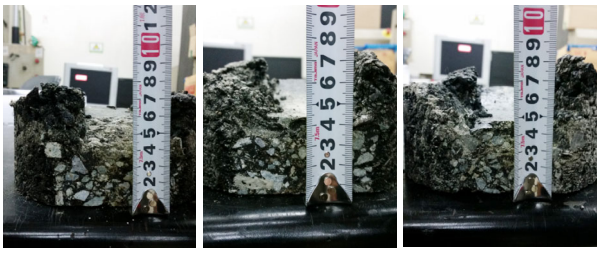
Fig. 14는 함부르크 휠 트래킹 실험 후, 공시체를 보여준 것이다. 인도네시아 가열 아스팔트 혼합물의 경우에는 아스팔트 대부분이 박리되어 시편의 가장자리로 쏠린 것을 확인할 수 있으며, 인도네시아 개질 아스팔트와 몬순기후형 중온 개질 아스파트 혼합물의 경우에는 함부르크 차륜 하중이 20,000회 통과 후에도 아스팔트가 골재에서 박리되지 않은 것을 육안으로 확인할 수 있었다.



(A) HMA (B) PMA (C) PWMA

Fig. 14 Specimen After Hamburg Wheel Tracking Test

Fig. 15는 함부르크 휠 트래킹 실험 후, 각 공시체의 변형 형상을 보여준다. Fig. 15에서 볼 수 있듯이, 인도네시아 일반 아스팔트 혼합물과 개질 아스팔트 혼합물, 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물 순으로 소성변형이 많이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 몬순기후형 중온 개질 첨가제가 인도네시아의 고온 및 긴 우기를 가진 기후조건에 적합하며 특히 중차량이 많은 도로구간에 적용할 경우 우수한 성능을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.



(A) HMA (B) PMA (C) PWMA

Fig. 15 Permanent Deformation of Specimens After Hamburg Wheel Tracking Test

3.5.4. 휠트래킹 시험 결과

Fig. 16과 Fig. 17은 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물과 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물의 동적안정도 및 변형속도, 차륜 하중 재하에 따른 처짐량을 각각 나타낸 것이다. 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물이 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물보다 소성변형에 대한 저항성이 큰 것으로 나타났으며, 동적안정도는 각각 2,739회/mm, 3,150회/mm로 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물 품질기준인 2,500회/mm를 만족하는 것으로 나타났다.

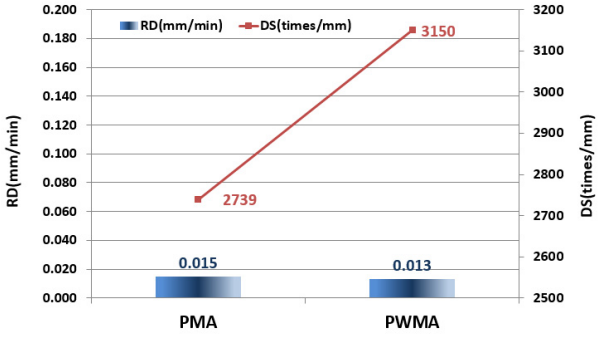


Fig. 16 RD and DS for PMA and PWMA

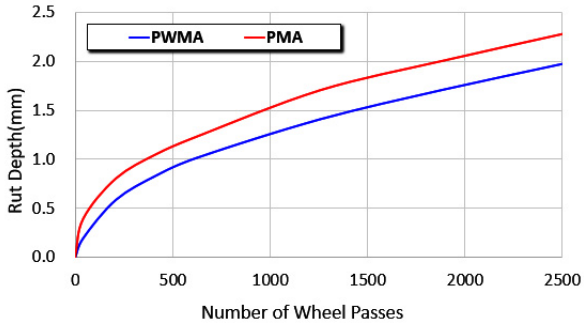


Fig. 17 Rut Depth of PMA and PWMA

4. 결론

현재, 개발도상국은 지역간에 경제교류 및 국민들의 삶의 질을 향상시키기 위해 국가기반시설 가운데 가장 기본적인 도로건설에 대규모 예산을 투자하고 있다. 하지만, 지리적 위치에 따른 환경하중, 급격히 증가하는 교통하중 및 도로포장 기술의 부재로 인해 아스팔트 포장의 수명이 공용수명에 이르지 못하고 조기에 파손이 발생하는 상황이다.

특히, 인도네시아의 경우에는 년 중 약 6개월 동안 비가 내리는 우기와 과적차량 및 교통량의 증가로 인하여 소성변형, 포트홀 및 골재박리와 같은 조기 파손이 아스팔트 포장에서 빈번히 발생하고 있다.

본 연구에서는 이러한 몬순기후 국가의 아스팔트 포장 파손 문제를 해결하고자 국내에서 보유하고 있는 중

온 아스팔트 기술의 원천기술을 개발도상국의 환경조건, 차량하중 조건 및 시공조건을 고려한 개발된 맞춤형 중온 개질 아스팔트 혼합물의 물성평가를 수행하였다.

본 연구를 통해 얻은 연구내용 및 연구결과는 다음과 같다.

1. 인도네시아는 도로포장에서 아스팔트 포장이 96%이상을 차지하고 있는 국가로서 보다 빠르고 안전한 물류수송 및 여행자들의 삶의 질을 향상시키기 위해 도로 인프라 건설에 많은 예산을 투자하고 있는 상황이다. 해당국가의 정부에서도 환경하중과 차량하중에 적합한 아스팔트 포장 기술 개발을 통해 도로포장의 성능을 향상시킬 수 있는 기술을 필요로 하고 있다.
2. 중온 아스팔트 기술은 전 세계적으로 가열 아스팔트 포장을 대체할 수 있는 기술로 인정받았으며, 약 20~30 종류의 중온 아스팔트 기술이 상용화되어 사용되고 있다. 국내에서도 개발한 중온 아스팔트 기술도 경제성, 수분저항성, 재활용률에서 세계 최고로서의 원천기술을 보유하고 있다.
3. 개질 아스팔트는 일반 아스팔트보다 고온 및 저온 특성을 향상시켜 줌으로써 아스팔트 포장에서 주로 발생하는 소성변형 저항성, 피로균열 저항성, 온도균열 저항성, Top-down 균열 저항성을 개선하여 아스팔트 포장의 공용수명을 증가시켜 준다. 하지만, 개질 아스팔트는 폴리머 개질제를 함께 사용하므로 점도가 높아져 개질 아스팔트 혼합물의 작업성을 확보하기 위해서는 아스팔트 혼합물의 생산온도(170℃~190℃) 및 시공온도(140℃~160℃)가 일반 아스팔트 혼합물보다 높은 온도에서 관리해야 하는 단점이 있다. 만약, 생산온도 및 시공온도가 낮아지면 개질 아스팔트는 골재를 코팅하는데 문제가 발생하며, 현장에서 다짐도 확보가 어려워 조기 파손으로 연결될 수 있다. 또한, 개질 아스팔트 생산 및 시공온도를 높게 관리하므로 연료소비량과 유해가스 발생량이 증가하여 경제적, 환경적으로 문제점을 노출하고 있다. 따라서, 아스팔트 혼합물의 생산온도 및 시공온도를 낮출 수 있는 중온 아스팔트 기술과 융합하여 사용할 경우 개질 아스팔트의 작업성 및 다짐도를 향상시켜 우수한 품질의 개질 아스팔트 포장을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물 배합설계 결과, 인도네시아에서 사용하고 있는 개질 아스팔트 혼합물보다 약 30℃~40℃ 낮은 온도에서 다짐밀도 및 공극율을 확보하여 원거리 공사에서도 사용이 가능할 것으로 평가되었다.
5. 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 및 수분민감도를 평가하기 위해 인도네시아 일반 가열 아스팔트 혼합물, 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물에 대하여 동적수침시험, 인장강도비 시험, 함부르크 휠 트래킹시험, 휠 트래킹 시험을 각각 수행하였다. 시험결과, 몬순기후형 중온 개질 아스팔트 혼합물의 소성변형저항성 및 수분민감도는 인도네시아 일반 아스팔트 혼합물과 인도네시아 개질 아스팔트 혼합물보다 우수한 것으로 나타나 인도네시아의 기후 및 교통조건에 적합한 기술로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 "중온 개질 아스팔트 기술 검증을 통한 기술 사업화 기반 구축 사업"의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

REFERENCES

AASHTO T 283-07 (2007). *Standard method of test for resistance of compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to moisture-Induced damage*, American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T 324-11 (2011). *Standard method of test for Hamburg Wheel- Tracking testing of compacted Hot-Mix Asphalt*, American Association of State Highway and Transportation Officials.

British Standard EN 12697-11 (2003). *Test methods for hot mix asphalt – Part 11 : Determination of the affinity between aggregate and bitumen*, British Standard Institution.

Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Aderson, M. (1994). *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays, Strategic Highway Research Program*, National Research Council, Washington D.C., U.S.

Federal Highway Administration (FHWA) (2012). *An Alternative Asphalt Binder, Sulfur-Extended Asphalt(SEA)*, U.S Department of Transportation.

Kim, Y.J. (2013). Development of Plant-Mixed Type Polymer-Modified Asphalt with Warm-Mix Asphalt Technology for Mongolian Road, *1st International Mongolia Road Expo & Conference*, Mongolian Road Association.

Kim, Y.J. (2014). Development and Application of Polymer-Modified Warm-Mix Asphalt Technology Customized for Mongolia Road Condition, *2nd International Mongolia Road Expo & Conference*, Mongolian Road Association.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2014). *Development of Customized Polymer-Modified WMA*

Technology for Weather and Traffic Conditions in Developing Countries (in Korean).

KS F 2374 (2010). *Standard test method for Wheel tracking of asphalt mixtures*, Korean Standard Association.

Lee, H.S., Glueckert, T., Ahmed, T., Kim, Y.J., Baek, C.M., Hwang, S.D. (2013). Laboratory Evaluation and Field Implementation of Polyethylene Wax-Based Warm Mix Asphalt Additive in USA, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Chinese Society of Pavement Engineering.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017). *Guidelines for Asphalt Concrete Pavement Construction* (in Korean).