

개질 유황결합재를 사용한 중온아스팔트 혼합물의 특성

Characteristics of the Warm-Mix Asphalt Mixtures Using the Modified Sulfur Binder

김세원¹ · 박흥석² · 김종규³ · 정용욱^{4*}Se-Won Kim¹ · Hung-Suck Park² · Jong-Kyu Kim³ · Yong-Wook Jung^{4*}

(Received December 8, 2016 / Revised December 20, 2016 / Accepted December 21, 2016)

In this study, the Warm-Mix Asphalt was prepared using a modified Sulfur Binder mixed with an additive of a polymer component in sulfur, which is an industrial by-product generated in the crude oil refining process. The dynamic stability and durability characteristics of the prepared Warm-Mix Asphalt was evaluated by the indirect tensile strength, the tensile strength ratio before and after water immersion and freezing-thawing, and the dynamic stability by wheel tracking test. The Warm-Mix Asphalt Mixtures using Modified Sulfur Binder has a tensile strength ratio before and after water immersion of 0.88, which is about 1.13 times that of the Warm-Mix formed modified Asphalt, and the tensile strength ration before and after freezing-thawing is also 0.82, thus, all tensile strength ratios satisfied the KS quality standard value of 0.75 or more. The indirect tensile strength was 1.6MPa which was twice the KS quality standard value of 0.8MPa, and about 1.24 times higher than that of normal heated asphalt 1.29MPa.

In addition, the dynamic stability by the wheel tracking test was 14,075 times/mm, which was about 15 times higher than that of normal heated asphalt and about 3 times higher than that of the Warm-Mix formed modified Asphalt, showing excellent resistance to plastic deformation such as fatigue cracks.

키워드 : 유황, 폴리머, 개질유황결합재, 중온아스팔트**Keywords :** Sulfur, Polymer, Modified sulfur binder, Warm-mix asphalt

1. 서론

최근 전 세계적으로 환경오염 및 지구 온난화에 대한 문제가 이슈화되면서 다양한 방법으로 지구 온난화와 환경오염을 감소시킬 수 있는 방법에 관심이 집중되고 있다. 이와 관련하여 국내 건설 공사에서도 폐자원의 건설재료로의 재활용 증대 및 지구 온난화에 따른 이산화탄소저감 기술개발 등 다양한 연구가 진행되고 있다 (Lee et al, 2009; Kim et al, 2010).

특히 도로포장재료인 가열아스팔트 혼합물은 제조 및 시공과정에서 작업성과 현장 다짐도 확보 등에 필요한 온도 유지를 위해 많은 화석 에너지를 소비하면서 다량의 온실가스(CO₂)를 발생시

키고 있다(Yang et al, 2012). 이러한 측면에서 국내에서도 이를 개선하기 위한 다양한 포장기술의 개발 및 상용화를 추진하고 있는 실정이며, 일례로 중온아스팔트 포장기술을 들 수 있다(Hwang et al, 2009; Yoo et al, 2011; Baek et al, 2013).

중온아스팔트 포장은 첨가제나 특수기술 등을 사용하여 가열아스팔트와 비교하여 생산 및 시공과정에서 작업성과 현장다짐도 확보 등에 필요한 온도를 약 30℃정도 저감시킬 수 있는 도로포장 공법이다(Kim et al, 2008; Kim et al, 2016). 국내에서 아스팔트 혼합물에서 개질 아스팔트의 적용은 97년 이후 SBS개질 아스팔트가 생산되기 시작하여 중온, 상온 아스팔트 등에 대한 기술연구가 진행되면서 최근 들어 시장에 공급되기 시작하였으나, 일반 아스

* Corresponding author E-mail: jyw@kmu.ac.kr¹울산대학교 친환경건축자재사업단 책임연구원 (Department of Center for Green Construction Material, Ulsan, 44610, Korea)²울산대학교 건설환경공학부 교수 (Department of Civil & Environmental Engineering, Ulsan University, Ulsan, 44610, Korea)³경남대학교 토목공학과 조교수 (Department of Civil Engineering, Kyungnam University, Kyungnam, 51767, Korea)⁴계명대학교 첨단건설재료실험센터 조교수 (Department of COMTEC, Keimyung University, Daegu, 42601, Korea)

팔트 대비 고가의 가격, 초기 아스콘 생산 및 시공과정에서의 시행착오로 인한 공용성능 확보 미흡, 발주처의 보수적인 접근, 개질업체 간 과도한 판매 경쟁으로 안정적인 포장기술 및 표준화된 기준 확보 미흡 등의 사유로 수요확산이 활성화되지 못하고 있었다 (Park 2010). 그러나 최근 들어 자동차 수요의 증가, 교통체증, 중차량 증가 등 도로 위 하중의 지속적인 증가와 지구온난화 등으로 도로 위 온도 역시 증가되면서 일반 아스팔트로는 품질적인 한계를 보이면서 중온, 상온 등의 개질 아스팔트의 적용은 증가하고 있는 추세이다(Ahmed et al, 2013).

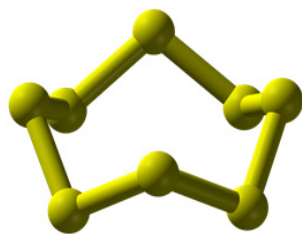
본 연구에서는 석유제품 생산 시 원유의 정제과정에서 발생하는 산업부산물인 유황에 폴리머 성분의 첨가제를 혼입하여 개질유황결합재를 사용하여 중온아스팔트 혼합물을 제조하였으며 이에 대한 특성을 검토하였다. 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트 혼합물의 특성은 유해물질, 악취물질 등의 환경성 분석과 안정도, 흐름값, 공극률 및 포화도 등의 기초특성 평가 후 중온아스팔트 혼합물의 간접인장강도, 수침전후 및 동결융해 전후 인장강도비와 휠트래킹 시험에 의한 동적안정도 등의 역학 및 내구 특성을 평가하여 기존 기술과의 성능을 비교 검토하였다.

2. 개질유황결합재의 재료 및 특성

본 연구는 개질유황결합재를 사용한 현장 플랜트 믹스형(Plant mix type) 중온 아스팔트 혼합물의 특성을 검토한 것으로 시험에 사용한 개질유황결합재(Thiomer)의 특성은 다음과 같다.

2.1 개질유황결합재의 재료

본 연구에서는 플랜트 배합 방식에 의해 개질유황결합재를 AP의 일부와 치환함으로써 별도의 추가첨가제의 투입 없이도 품질이 우수하고 일반 가열 아스팔트 혼합물보다 낮은 온도에서 생산 및 현장다짐이 가능한 중온 아스팔트 혼합물 제조기술이다. 본 연구



Cyclooctasulfur, S₈

Fig. 1. Sulfur

의 주원료는 원유의 정제과정에서 발생하는 산업부산물인 유황(Sulfur)으로 원소기호 S, 원자량 : 32.066g/mol, 상온에서 연노란색의 고체 결정이며, 녹는점은 115.21℃이며, Fig. 1에 나타내었다.

2.2 개질유황결합재의 메카니즘

개질유황결합재는 이중 자켓구조로 된 반응기로부터 120~140℃의 온도에서 유황(Sulfur) 라디칼과 개질제(hydrocarbon)의 Diels-Alder 반응기반 ROMP(Ring-Open Material Polymerization) 반응을 통해 제조할 수 있다. 개질제로는 Cyclic Aliphatic 구조를 지닌 DCPD(Dicyclopentadiene)와 ENB(5-ethylidene-2-norbornene)가 주로 사용되며, 액상의 사이클로펜타디엔 dimer는 상온에서 연속적으로 monomer로 de-polymerize되는데 이 반응은 유황의 존재하에 120℃에서 140℃로 온도가 상승할 때 매우 가속화 된다. 개질유황결합재의 중합 반응 메카니즘은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Modified sulfur binder polymerization mechanism

Classification	Polymerization	Remark
Reaction I	<p>CPD + S₈ → Sulfur-cyclopentadiene adduct + Heat</p>	Highly exothermic
Reaction II	<p>DCPD + S₈ → Linear polymer + S₈-Linear polymer</p>	Less exothermic than reaction I

Table 1에서 반응 I은 유황과 사이클로펜타디엔의 발열반응이며, 반응 II는 사이클로펜타디엔 다이머와 반응 I에 의해 형성된 폴리설파이드와의 반응을 통해 Fig. 2와 같이 유황 고유의 속성이 개선된 개질유황결합재를 제조할 수 있다.

Fig. 2와 같은 중합반응에 의해 제조된 개질유황결합재는 순수 유황과는 달리 황의 결정구조가 억제되고, 연성(Ductility)이 증가되어 기존 골재의 접합물질로 사용되던 아스팔트를 대체할 수 있는 결합재 역할을 할 수 있다. 개질유황결합재는 골재바인더로서 아스팔트 바인더로 사용될 때는 충분히 골재를 코팅할 수 있도록 빨리 용융될 수 있도록 하기 위하여 Powder type을 사용한다. Powder의 입도분포곡선은 Fig. 3과 같이 최대 948.3μm, 평균 264.3μm의 입경을 가지고 있다.

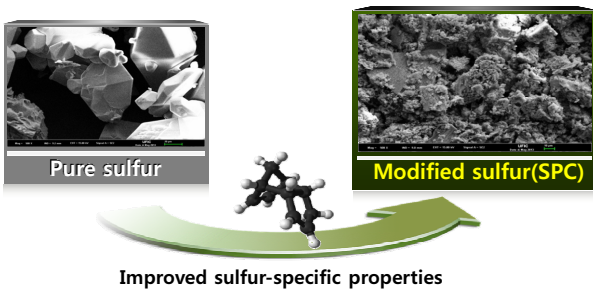


Fig. 2. Thiomer production

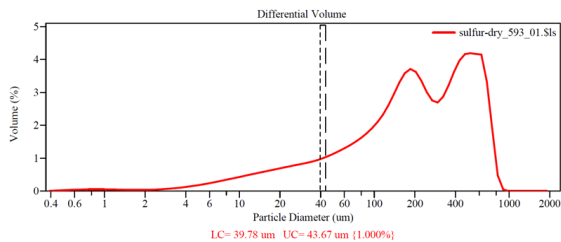


Fig. 3. The particle size distribution curve of modified sulfur binder

2.3 개질유황결합재 혼합방법

위 방법으로 생산된 개질유황결합재(Thiomer)는 플랜트로 이송되어 아스팔트 혼합물의 소재로 활용되는데, Fig. 4와 같이 가열된 골재에 첨가제 개념이 아닌 바인더 개념으로 기존 바인더인 AP-5의 일부를 감한 후 이를 개질유황결합재로 치환하여 플랜트 현장 배합방식으로 고기능성 중온 아스팔트 혼합물을 생산한다.

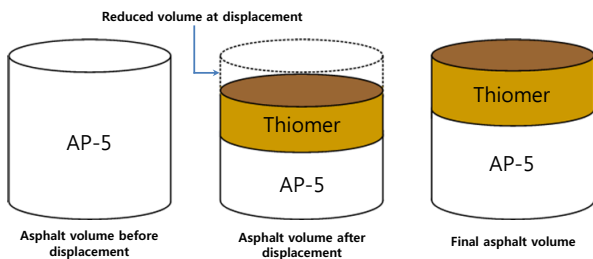


Fig. 4. Mixed methods modified sulfur binder

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 연구에서는 원유정제과정에서 발생하는 산업부산물인 유황과 폴리머 성분의 개질제의 중합반응 생성물인 개질유황결합재(Thiomer)를 사용하여 제조한 중온아스팔트 혼합물의 역학 및 내

구특성을 검토하였다. 개질유황결합재의 성능은 기존 중온포드아스팔트 및 일반가열아스팔트와 비교검토 하였으며, 각 혼합물의 배합표는 Table 2와 같다.

Table 2. Mix design

Item	Binder (% , wt)	Aggregate(% , wt)			Total (% , wt)
		13mm	8mm	Filler	
Thiomer	7.1 (AP-5 2.7+ Thiomer 4.4)	27.9	61.3	3.7	100
Foamed	4.7	27.9	63.7	3.7	100
Normal	5.6	27.9	62.8	3.7	100

Remark) Thiomer: Modified sulfur asphalt
Foamed: Medium temperature foamed asphalt
Normal: Normal heated asphalt

측정항목은 Table 3과 같이 KS 규격의 실험방법에 준하여 간접 인장강도, 수침전후 및 동결융해 전후 인장강도비와 휠트랙킹 시험에 의한 동적안정도 시험을 실시하였다. 또한 각 실험항목별 기준값은 한국아스콘공업협동조합연합회의 단체표준인 SPS-KAI0002-F2349-5687의 가열아스팔트 혼합물에 규정된 값을 기준으로 하였다.

Table 3. Test items and standards

Item	Test items	Unit	Standard	Test methods
Thiomer, Foamed, Normal	Indirect tension strength	N/mm ²	-	KS F 2382
	Tensile strength ratio (TSR)	-	More than 0.75	-
				KS F 2398
Dynamic stability	Times/mm	More than 750	KS F 2374	

3.2 실험방법

3.2.1 간접 인장강도

간접 인장강도의 측정은 KS F 2382에 준하여 실시하였으며, Fig. 5와 같이 공시체를 온도조절 장치에 보관 후 시험기에 거치시켜 최대 하중이 측정되어 하중이 감소될 때까지 50mm/min의 속도

로 재하 하여 식 (1)과 같이 간접인장강도를 계산하였다.

$$S_T = \frac{2P}{\pi Dh} \quad (1)$$

여기서,

- S_T : 간접 인장강도(MPa)
- P : 공시체 파괴 하중(N)
- D : 공시체 지름(mm)
- h : 공시체 높이(mm)



Fig. 5. Indirect tensile strength measurement



적 안정도를 평가하기 위하여 KS F 2374에 준하여 Fig. 6과 같이 시험 차륜 하중을 재하 후 변형량을 측정하였다.

시험 방법은 공시체를 시험기에 설치하고, 시험 차륜 하중은 686N으로 고정시키고, 총 재하 하중을 접지 면적으로 나눈 접지압이(628±15)kPa이 되도록 유지하여 시험을 실시하였다.



Fig. 6. Dynamic stability measurement

차륜 하중에 의한 공시체의 변형량의 측정은 1분, 5분, 10분, 15분, 30분, 45분, 60분이 경과한 때의 침하 깊이를 측정하고 기록 하였다. 동적안정도(DS: Dynamic Stability)는 공시체의 표면으로부터 1mm 변형하는 데 소요되는 시험 차륜의 통과 횟수로서 식 (3)으로 계산하였다.

$$DS = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times C \quad (3)$$

여기서,

- DS : 동적 안정도(회/mm)
- t_1 : t_1 (일반적으로 45분)에서의 변형량(mm)
- t_2 : t_2 (일반적으로 60분)에서의 변형량(mm)
- C : 크랭크에 의한 변속 구동형 시험기를 사용한 경우의 보정 계수=1.0(크랭크 방식 이외의 구동 방식인 경우는 비교 시험을 실시하여 보정 계수를 산출하여 적용)

3.2.2 인장강도비(TSR)

인장강도비의 측정은 KS F 2398에 준하여 실시하였으며, 시험 방법은 건조용 공시체와 동결융해 시험용 공시체를 각각 준비하여 KS F 2382에 따라 간접 인장강도 시험을 실시하여 각각의 인장강도를 측정하였다. 인장강도비는 건조 공시체의 인장강도의 평균값과 동결융해 공시체의 인장강도의 평균값을 이용하여 식 (2)로 계산 하였다.

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \quad (2)$$

여기서,

- TSR : 인장강도비
- S_1 : 건조 공시체의 인장강도 평균(N/mm²)
- S_2 : 수분 처리 공시체의 인장강도 평균(N/mm²)

3.2.3 동적 안정도

개질유황결합재(Thiomer)를 사용한 중온아스팔트 혼합물의 동

4. 실험결과 및 고찰

4.1 간접 인장강도

Fig. 7에 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트와 중온포드 아스팔트, 일반가열 아스팔트의 간접 인장강도 특성을 나타내었다.

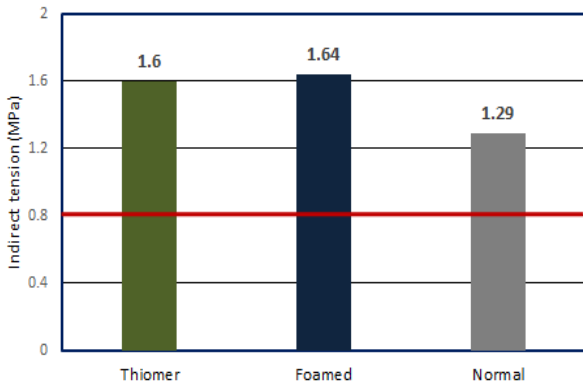


Fig. 7. Indirect tension strength

Fig. 7에서 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트의 간접인장 강도는 1,60MPa로 중온폼드아스팔트 1,64MPa와 유사하며 일반 가열 아스팔트 1,29MPa보다 약 1,25배 높게 나타났다. 이것은 개질 유황결합재의 중합반응에 의한 기존 골재의 접합물질인 아스팔트 결합재로의 작용에 의한 것으로 판단할 수 있다.

4.2 인장강도비(TSR)

본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 건조상태에서의 간접 인장강도와 수분 포화 및 동결융해 후 상태에서의 간접 인장 강도를 측정하였다. Fig. 8에 수침전후 인장강도비를, Fig. 9에 동결융해전후 인장강도비를 각각 나타내었다.

Fig. 8과 같이 개질유황결합재를 사용한 아스팔트 혼합물의 수침전후 인장강도비는 일반가열 아스팔트의 0,83보다 높은 0,88로 나타났으며, 중온폼드 아스팔트의 0,78과 비교하여 약 13%정도 개선된 인장강도비를 나타내어 수침에 대한 내구성 등이 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 9의 동결융해전후 인장강도비는 일반가열아스팔트와 개질 유황결합재를 사용한 아스팔트에 대한 것으로 일반가열 아스팔트의 경우 0,78로 SPS-KAI0002-F2349-5687의 0,75 이상을 만족하고 있으나, 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트는 0,82보다는 낮게 나타났다. 이와 같이 개질유황결합재는 수침전후 및 동결융해 전후 인장강도비가 일반아스팔트보다 높아 최근 수분침투와 동결융해 등에 의한 포트 홀 등에 대한 저항성이 우수할 것으로 판단된다.

4.3 동적 안정도

개질유황결합재를 사용한 아스팔트 혼합물의 동적안정도는 휠

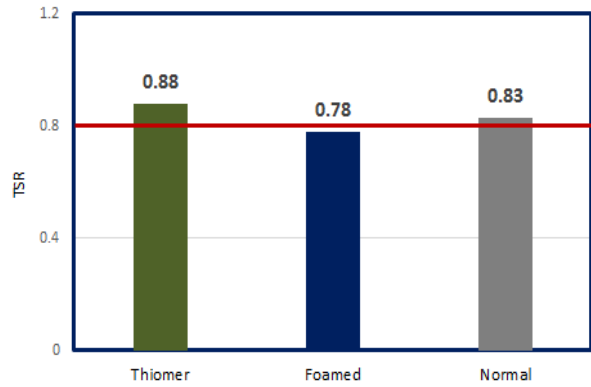


Fig. 8. Tensile strength ratio(Before and after soaking)

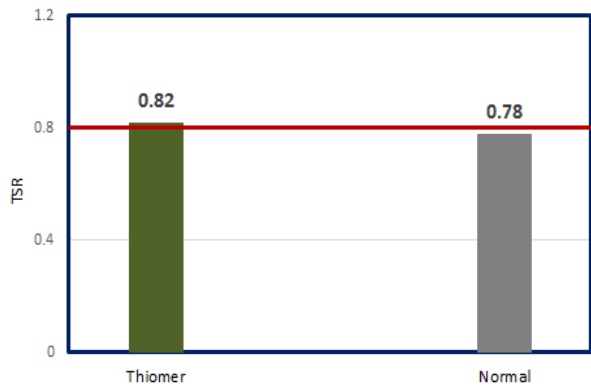


Fig. 9. Tensile strength ratio(Before and after freezing and thawing)

트랙킹 시험에 의한 반복적인 차량하중에 대한 동적안정도 및 소성 변형 저항성을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10에서 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트의 동적 안정도는 14,075회/mm, 중온폼드 아스팔트 4,981회/mm, 일반가열 아스팔트 995회/mm로 모두 SPS-KAI0002-F2349-5687의 품질 기준 값 750 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 개질유황결합재의 사용은 중온폼드 아스팔트의 약 3배, 일반가열 아스팔트의 약 15배 수준으로 높은 동적안정도를 나타내어 아스팔트의 소성변형 등에 대한 저항성이 우수할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 개질유황결합재를 사용한 아스팔트와 일반가열 아스팔트에 대한 휠트랙킹시험 후 시험체 전경을 나타낸 것으로 육안 평가에서도 개질유황결합재를 사용한 아스팔트가 일반가열 아스팔트에 비해 패인 흠의 정도가 작은 것을 알 수 있다.

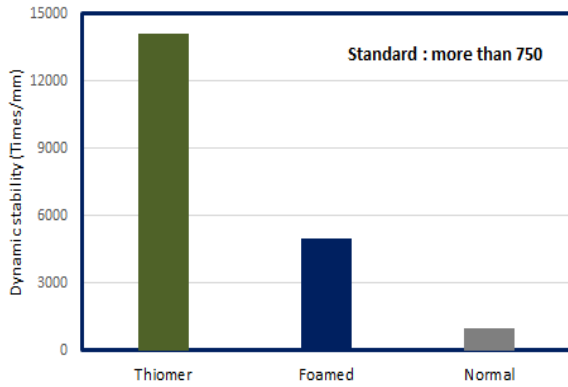


Fig. 10. Dynamic stability by wheel tracking test

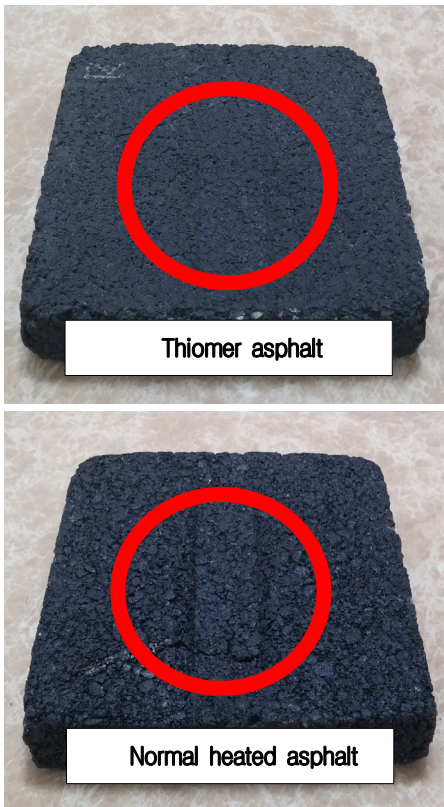


Fig. 11. View of specimen after wheel tracking test

5. 결론

본 연구는 원유의 정제과정에서 발생하는 산업부산물인 유황에 폴리머 성분의 첨가제를 혼합하여 개질유황결합재를 사용하여 중온아스팔트 혼합물을 제조하고 그 특성을 검토한 것으로 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트의 간접인장강도는 1.60MPa로 중온폼드아스팔트 1.64MPa와 유사하며 일반가열 아스팔트 1.29MPa보다 약 1.25배 높게 나타났다.
2. 개질유황결합재를 사용한 아스팔트 혼합물의 수침전후 인장강도비는 일반가열 아스팔트의 0.83보다 높은 0.88로 나타났으며, 중온폼드 아스팔트의 0.78과 비교하여 약 13%정도 개선된 인장강도비를 나타내어 수침에 대한 내구성 등이 우수한 것으로 나타났다.
3. 동결융해전후 인장강도비는 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트가 0.82, 일반가열 아스팔트는 0.78로 SPS-KAI0002-F2349-5687의 기준값 0.75 이상을 만족하고 있으나, 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트가 약 0.04 높게 나타나 최근 수분침투와 동결융해 등에 의한 포트 홀 등에 대한 저항성이 우수할 것으로 판단된다.
4. 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트의 동적 안정도는 14,075회/mm로 중온폼드 아스팔트 4,981회/mm의 약 3배, 일반가열 아스팔트 995회/mm의 약 15배로 높은 동적안정도를 나타내어 아스팔트의 소성변형 등에 대한 저항성이 우수할 것으로 판단된다.

References

- Ahmed, T.A., Hajj, E.Y., Sebaaly, P.E., Majerus, N. (2013). Influence of aggregate source and warm-mix technologies on the mechanical properties of asphalt mixtures, *Advances in Civil Engineering Materials*, **2(1)**, 400-417.
- Baek, C., Yang, S., Hwang, S., (2013). Development and performance evaluation of liquid-type chemical additive for warm-mix asphalt, *International Journal of Highway Engineering*, **15(4)**, 107-116 [in Korean].
- Hwang, S.D., Kim, Y.J., Lee, H.S., (2009). Warm mix asphalt using foamed asphalt technology, *Korean Society of Road Engineers*, **11(2)**, 34-40 [in Korean].
- Kim, N.H., Kim, J.C., Hong, J.P., Kim, K.W. (2010). Evaluation of fundamental properties of warm-mix recycled asphalt concretes, *International Journal of Highway Engineering*, **12(4)**, 111-120 [in Korean].
- Kim, S.H., Yang, J.Y., Jang, S.S., Jung, Y.W. (2016). Basic characteristics of the warm-mix asphalt mixtures with modified sulfur binder, *Journal of Korean Concrete Institute*,

- 28(1)**, 599–600 [in Korean].
- Kim, Y.J., Im, S.H., Lee, H.S., Hwang, S.D. (2008). Evaluation of warm mix asphalt mixtures with foaming technology and additives using new simple performance testing equipment, *International Journal of Highway Engineering*, **10(4)**, 19–29, [in Korean].
- Lee, J.M., Kim, N.S., Kim, W.S., Hong, E.C. (2009). A development of cold-mixed reclaimed asphalt pavement materials, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **9(3)**, 1–7 [in Korean].
- Park, T.S. (2010). A study on performance of the recycle asphalt mixtures using the foamed asphalt method, *International Journal of Highway Engineering*, **12(4)**, 203–209 [in Korean].
- Yang, S.L., Baek, C.M., Jeong, K.D., Kim, Y.M., Kim, Y.J., Hwang, S.D. (2012). A study on field application and laboratory performance evaluation of warm mix asphalt, *International Journal of Highway Engineering*, **14(4)**, 9–18 [in Korean].
- Yoo, I.S., Cho, D.W., Hwang, S.D., Rhee, S.K. (2011). A study of warm-mix asphalt's bonding properties on the change of asphalt film thicknesses, *International Journal of Highway Engineering*, **13(4)**, 29–40 [in Korean].

개질 유황결합재를 사용한 중온아스팔트 혼합물의 특성

본 연구는 원유정제과정에서 발생하는 산업부산물인 유황에 폴리머 성분의 첨가제를 혼합한 개질유황결합재를 사용하여 중온아스팔트 혼합물을 제조하고, 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트 혼합물의 간접인장강도, 수침전후 및 동결융해 전후 인장강도비와 휠트랙킹 시험에 의한 동적안정도 등의 역학 및 내구 특성을 평가하였다. 실험결과, 개질유황결합재를 사용한 중온아스팔트 혼합물의 수침전후 인장강도비는 0.88로 중온 폼드 개질 아스팔트의 약 1.13배이며, 동결융해 전후의 인장강도비 또한 0.82로 인장강도비 KS 품질기준 값 0.75 이상을 모두 만족하였다. 간접인장강도는 1.60MPa로 KS 품질기준 값 0.80MPa의 2배, 일반가열아스팔트의 1.29MPa과 비교하여 약 1.24배 높은 간접인장강도를 나타내었다. 또한, 휠트랙킹 시험에 의한 동적안정도는 14,075 회/mm로 일반가열아스팔트의 약 15배, 중온 폼드 개질 아스팔트의 약 3배로 피로균열 등 소성변형에 대한 저항성이 매우 우수하게 나타났다.