

고내구성 교면포장용 SBS 개질 아스팔트 개발 연구

Development of SBS Modified Asphalt for High Durable Bridge Deck Pavements

김광인* · 심상현** · 이현종***

Kim, Kwang In · Sim, Sang Hyun · Lee, Hyun Jong

1. 서 론

교면포장은 사용자들에게 안전성과 편의성을 제공하여 차량의 소통을 위한 포장층의 역할뿐만 아니라 교량상판을 보호하는 기능도 동시에 수행되어야 하기 때문에 교량의 내구성 확보 측면에서도 교면포장의 내구성 확보는 필수적이다. 특히 교면포장은 진동 및 충격, 혹독한 기상조건에 노출이 되어있고, 포장체내 침투수가 장기 체류하기 때문에 일반 도로포장보다 더 큰 파손요인이 상존하고 있으며, 교통소통의 문제로 인해 유지보수 또한 쉽지 않은 실정으로 인하여 선진국에서는 일반 도로포장에 비해 고가인 공용성이 우수한 포장재료로 포장을 시행하고 있다. 현재 국내의적으로 교면포장 재료로 가장 많이 적용되고 있는 아스팔트의 경우 피로 및 소성변형 저항성을 향상시키기 위하여 다양한 개질재가 개발되어 사용되고 있다. 이러한 다양한 개질재 가운데 최근 가장 신뢰성이 높은 개질재료는 SBS(Styrene-Butadiene-Styrene) 계통의 폴리머를 들 수 있다. 일반적으로 SBS를 많이 첨가할수록 개질 아스팔트의 피로저항성은 향상되나 너무 많이 첨가할 경우 점도가 상승하여 생산성 및 작업성이 현저히 떨어진다. 이에 따라 기존의 국내 SBS 개질 아스팔트는 침입도가 60~80인 기초 아스팔트에 SBS를 3~4% 첨가하여 개질 아스팔트를 생산하고 있다.

따라서 본 연구에서는 SBS의 첨가량을 증가시키기 위하여 기본적으로 점성이 낮은(침입도 100 이상) 기초 아스팔트를 개발하고 SBS 첨가량을 상향하여 생산성 및 작업성을 확보함과 동시에 기존의 SBS 개질 아스팔트에 비해 피로 및 소성변형 저항성이 개선된 새로운 교면포장용 고내구성 개질 아스팔트를 개발을 위한 연구를 수행하였다.

2. 고내구성 교면포장용 SBS 개질 아스팔트 바인더 개발

SBS 첨가량(4%, 5%, 6%, 8%)을 변화시켜 아스팔트 바인더에 대한 침입도, 연화점, 점도 등의 침입도 규격에 의한 평가를 실시하였다. 피로균열 저항성 및 저온균열 저항성, 소성변형 저항성을 측정하기 위하여 DSR, BBR시험 등의 공용성 등급 규격에 의한 평가를 실시하였다. 피로 저항성 및 소성변형 저항성, 생산성, 작업성을 종합적으로 고려하여 최적 SBS 함량을 결정하였다.

2.1 침입도 시험 및 결과 분석

침입도가 100이상인 기초 아스팔트에 SBS 함량을 4%, 5%, 6%, 8%로 첨가시켜서 바인더를 제조해서 침입도의 변화를 분석하였다. 표 1과 그림 1은 SBS 함량에 따른 침입도 변화를 나타낸 것이다. SBS 함량이 증가함에 따라 침입도는 감소하는 것으로 나타났다.

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 석사과정 · E-mail: ini502@hanmail.net

** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 석사과정 · E-mail: godsmac@nate.com

*** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · E-mail: hlee@sejong.ac.kr



표 1. SBS 함량 변화에 따른 침입도 변화

SBS 함량	4%	5%	6%	8%
기초 아스팔트 침입도	106	106	106	111
침입도, (0.1mm)	81	73	65	60

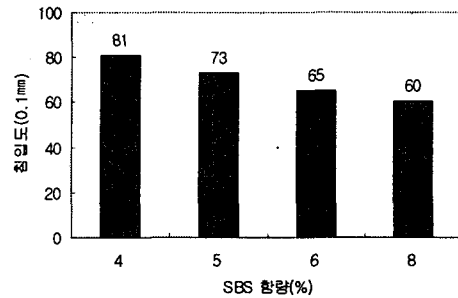


그림 1. SBS 함량 변화에 따른 침입도 변화

2.2 연화점 시험 및 결과 분석

SBS 함량 변화에 따른 연화점 시험은 KS M 2250에 따라 실시하였으며, 시험 결과는 그림 2와 같다. SBS 함량이 증가함에 따라 연화점 온도가 상승하였고, SBS 함량이 6%까지는 연화점이 거의 선형적으로 크게 증가하였다. 그러나 SBS 함량이 6%에서 8%로 증가할 경우 연화점은 1.1℃만 상승하여 증가량은 미미함을 알 수 있다.

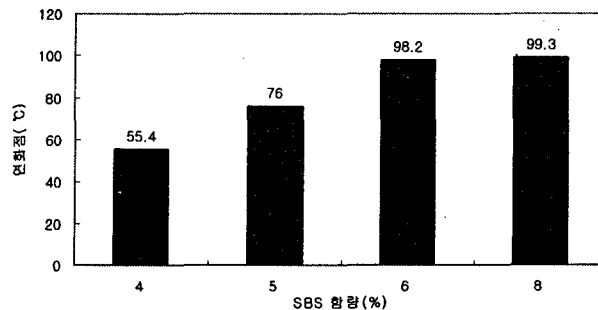


그림 2. SBS 함량 변화에 따른 연화점 시험 결과

2.3 회전점도(Rotational Viscometer)시험 및 결과 분석

회전 점도계를 이용한 아스팔트의 점도 측정 시험은 가열·혼합 플랜트에서 아스팔트를 펌핑하고 골재와 혼합할 때 아스팔트의 작업성을 측정하고 평가하는데 유용하게 사용된다. 본 연구에서는 ASTM D 4402(KS F 2392)에 따라 135℃에서 회전점도 시험을 실시하였으며, 시험 결과는 그림 3과 같다. SBS 함량이 증가함에 따라 점도가 급격히 상승함을 알 수 있다. 점도가 상승한다는 것은 아스팔트 바인더가 단단해져 플랜트에서의 생산성 및 작업성이 떨어진다는 것을 의미한다. SBS가 8% 첨가된 바인더를 제외한 바인더는 수퍼페이브에서 규정을 만족하였지만, SBS가 8% 첨가된 바인더는 기준치인 3000 cP를 상회하는 결과가 나왔다. 수퍼페이브 규정에서는 아스팔트가 모든 안전기준을 만족하는 온도에서 적절하게 압송되고 혼합된다는 것을 생산자가 보장한다면 이 요구사항을 자유재량사항으로 보류할 수 있다고 명시되어 있다. 따라서 SBS 8%를 첨가한 아스팔트 바인더의 점도가 높더라도 온도를 상승시켜 혼합하고 압송할 수 있기 때문에 생산성이나 작업성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

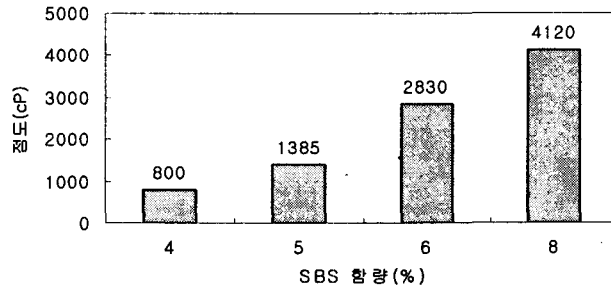


그림 3. SBS 함량 변화에 따른 점도 시험 결과(135°C)

2.4 소성변형에 대한 저항성시험 및 결과 분석

소성변형에 대한 저항성 시험은 원 아스팔트 바인더와 단기노화 후의 아스팔트 바인더에 대하여 동적전단시험(DSR)을 통하여 실시한다. 본 연구에서는 AASHTO TP5에 규정되어 있는 방법에 따라 DSR를 이용하여 아스팔트의 복소전단계수와 위상각을 측정하였으며, SBS 함량 변화에 따라 58°C~88°C의 온도에서, 노화되지 않은 상태, 단기 노화된 상태(RFTO 잔류물)에서 시험을 실시하였다.

그림 4는 슈퍼페이브에서 제안한 아스팔트 바인더의 공용성 규격에서 소성변형인자 $G^*/\sin\delta$ 의 온도와 SBS 함량에 따른 거동 특성을 분석한 것이다. 슈퍼페이브에 의하면 $G^*/\sin\delta$ 값이 클수록 소성변형에 대한 저항성이 우수한 것으로 간주한다. 원 시료 및 단기노화 시료 모두 온도가 증가할수록 $G^*/\sin\delta$ 값이 감소하였으며, 같은 온도에서 SBS 함량이 증가함에 따라 $G^*/\sin\delta$ 이 증가함을 알 수 있다. 이는 아스팔트가 고온에서 소성변형에 대한 저항성이 감소됨과 SBS 함량이 증가할수록 소성변형에 대한 저항성이 우수함을 의미한다. SBS 함량이 4% 바인더는 규격충족 최고온도인 64°C, 5% 바인더는 70°C, 6% 바인더는 76°C, 8% 바인더는 82°C로 나타나 하절기에 아스팔트 포장체의 온도가 상승할 때 SBS 함량이 증가될수록 소성변형에 대한 저항성이 우수한 것으로 평가 되었다.

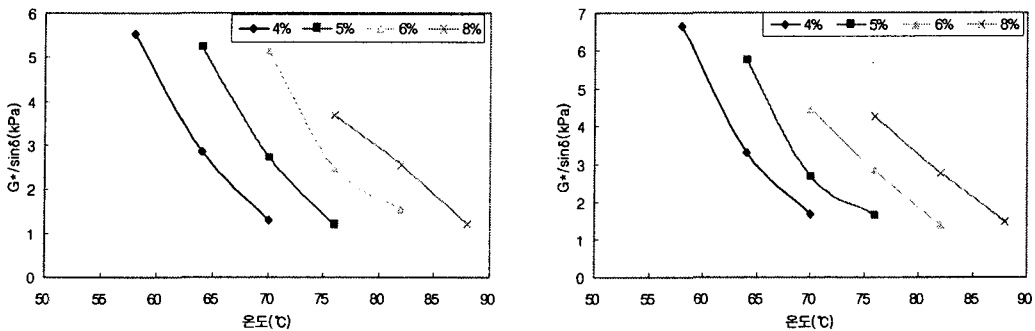


그림 4. SBS 함량 및 온도에 따른 $G^*/\sin\delta$ 변화 (좌: 원 시료, 우: 단기노화 시료)

2.5 피로 및 저온 균열에 대한 저항성 시험 및 결과 분석

피로균열의 저항성을 측정하기 위한 DSR시험은 압력노화시험(Pressure Aging Vessel)을 거친 아스팔트 바인더를 사용하는데, 압력노화시험은 공용중인 아스팔트 포장의 장기 노화를 모사하기 위함이다. 압력 노화 후 동적전단시험을 22°C, 25°C, 28°C에서 실시하였으며, 표 2는 슈퍼페이브에서 제안한 아스팔트 바인더의 공용성 규격에서 피로수명인자인 $G^* \cdot \sin\delta$ 의 온도와 SBS 함량에 따른 거동 특성을 분석한 것이다. 모든 장



기노화 시료가 시험온도에서 5000kPa 이하로 규정을 만족하였으며, 온도가 증가함에 따라 $G^* \sin \delta$ 값이 감소하였으며, 같은 온도에서는 SBS 함량이 증가함에 따라 $G^* \sin \delta$ 값이 감소하였다. 이는 SBS 함량이 증가하면 피로균열에 대한 저항성이 향상되는 것을 의미한다.

표 2. 장기노화 후 SBS 함량과 온도에 따른 $G^* \sin \delta$

구분		기준	4%	5%	6%	8%
피로균열저항능력 $G^* \sin \delta$, (kPa)	22℃	5000 이하	2552	1903	1825	1356
	25℃		1225	985	924	798
	28℃		736	-	-	-

저온균열에 대한 아스팔트 바인더의 저항성을 측정하기 위하여 바인더를 매우 낮은 온도에서 BBR(Bending Beam Rheometer)시험을 실시하였다. 기온이 갑자기 최저온도로 급강하하였을 때 아스팔트 포장층은 수축을 하게 되고 이로 인해 인장응력이 유발된다. 저온균열은 이러한 인장응력이 아스팔트 혼합물 자체 인장강도를 초과할 때 발생한다. BBR 시험은 AASHTO TP1의 시험절차에 따라 -12℃, -18℃, -24℃의 세 온도에서 SBS 첨가량을 변화시켜 시험을 실시하였다. BBR 시험을 통하여 크리프 스티프니스(S)와 m-value 값을 구할 수 있는데, 크리프 스티프니스는 일정한 하중 하에서 아스팔트의 강성을 나타내는 물성이며, m-value는 점탄성 물성의 하나로서 시험재료의 점탄성 특성을 평가하는 지표이다.

표 3은 SBS 함량과 온도에 따른 크리프 스티프니스를 나타낸 것이며, 온도가 상승할수록 아스팔트의 강성은 감소하는 것을 알 수 있고, -12℃, -18℃, -24℃에서 모두 SBS 함량이 증가함에 따라 강성이 감소하는 것으로 나타났다. 강성이 작을수록 저온균열에 유리하므로 SBS 함량이 증가하게 되면 저온균열이 발생할 확률이 적은 것으로 판단된다.

표 3. SBS 함량과 온도에 따른 Creep Stiffness

구분		기준	4%	5%	6%	8%
저온균열저항능력 (Creep Stiffness), MPa	-12℃	300 MPa 이하	102	91	77	-
	-18℃		222	210	182	160
	-24℃		450	410	343	340

표 4에서 보는 바와 같이 온도가 하강할수록 m-value는 감소하였으나 SBS 함량 변화에 따라서는 m-value가 유사한 것으로 나타났다. m-value가 클수록 저온균열에 유리하지만 SBS 함량이 m-value에 미치는 영향은 적은 것으로 판단된다.

표 4. SBS 함량과 온도에 따른 m-value

구분		기준	4%	5%	6%	8%
m-value	-12℃	0.3 이상	0.39	0.38	0.39	-
	-18℃		0.33	0.33	0.34	0.33
	-24℃		0.27	0.28	0.29	0.29

피로균열 및 저온균열을 대표하는 장기노화 후 동적전단응력($G^* \sin \delta$)과 크리프 스티프니스 항목을 측



정한 결과 규격을 충족하는 등급상의 최저 온도는 4종류의 아스팔트가 -28℃로 동일하게 나타났지만 SBS가 8% 첨가된 바인더가 다른 함량의 SBS 바인더에 비하여 우수한 결과를 보이고 있어 피로 및 저온균열 성능 면에서 우수한 것으로 나타났다. 다음의 표 5는 아스팔트 바인더의 물리적 특성시험을 통하여 결정된 SBS 함량에 따른 공용성 등급을 나타낸 것이다.

표 5. SBS 함량에 따른 공용성 등급

	4%	5%	6%	8%
최종 공용성 등급	PG 64-28	PG 70-28	PG 76-28	PG 82-28

2.6 아스팔트 바인더의 최적 SBS 함량 결정

아스팔트 바인더의 물리적 특성 시험을 통하여 SBS 함량이 증가함에 따라 소성변형에 대한 저항성, 피로 균열 및 저온균열에 대한 저항성이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 점도가 크게 상승하여도 온도를 상승 시켜서 혼합하고 압송할 수 있기 때문에 생산성이나 작업성에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 소성 변형 및 저온균열, 피로균열에 대한 저항성은 SBS 함량이 8%인 아스팔트가 우수한 것으로 나타났다. 따라서 고내구성 SBS 개질 아스팔트 개발을 위한 최적 SBS 함량은 8%로 결정하였으며, SBS가 8%로 첨가된 신규 개질 아스팔트 혼합물과 기존의 국내에서 주로 사용되고 있는 기존 SBS 개질 아스팔트(PG 76-22) 혼합물을 제작하여 실내 공용성 시험을 통하여, 두 혼합물 간의 성능을 비교 및 분석하고자 한다.

3. 실내 공용성 시험을 위한 배합설계

바인더 물리 역학적 시험을 통하여 SBS의 최적 첨가량을 8%로 결정하였고, 이를 바탕으로 개질 아스팔트 혼합물에 대한 실내 공용성 평가를 위한 혼합물을 제작하기 위하여 배합설계를 수행하였다. 물리 역학적 특성을 비교 분석하기 위하여 개발된 신규 개질 아스팔트 바인더와 기존의 국내에서 주로 적용되고 있는 SBS 개질 아스팔트(PG 76-22) 바인더를 사용하여 시험을 실시하였다. 국내외적으로 교면포장에 적용사례가 많은 최대입경 13mm 밀입도 골재를 사용하여 2종류의 혼합물을 생산하여 물성 및 공용성을 평가하였다. 교면포장의 표준용 혼합물의 마찰배합설계 기준의 경우 공극률 4%에서 최적 아스팔트 함량을 결정한다. 본 연구에서는 마살다짐기를 사용해 양면 75회 다짐을 실시해 시험시편을 제작하였다.

- 기준 혼합물 : 최대 입경 13mm 밀입도 + 기존 SBS PMA (PG 76-22)
- 신규 혼합물 : 최대 입경 13mm 밀입도 + 신규 SBS PMA (PG 82-28)

4. 고내구성 개질 아스팔트 혼합물의 실내 공용성 평가

교면포장에 적용하기 위해 개발한 고내구성 SBS 개질 아스팔트 바인더(PG 82-28)로 생산된 혼합물과 기존에 교면포장에 주로 적용되었던 SBS 개질 아스팔트(PG 76-22) 혼합물의 실내 시험을 통하여 피로손상과 소성변형 등에 대한 저항성을 평가하고자 하였다. 신규 혼합물과 기준 혼합물의 공용 특성을 분석하기 위하여 다양한 실내시험을 수행하였다. 균열에 대한 피로저항성을 분석하기 위하여 피로시험을 수행하였으며, 내유동 특성을 분석하기 위하여 휠트래킹 시험을 수행하였다. 또한 교면포장의 상판과 포장층과의 부착력을 분석하기 위하여 접착인장강도 시험을 수행하였으며, 저온에서의 균열저항성 분석을 위한 저온 휨 시험을 수행하였다.

4.1 피로시험

아스팔트의 바인더가 혼합물의 피로수명에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2종의 SBS 개질 아스팔트 혼



합물에 대하여 간접인장 피로시험을 실시하였다.

피로시험의 경우 하중은 10Hz의 주기를 갖는 Haversine 하중을 시편에 가한다. 일반적인 피로시험의 경우 0.1초의 하중재하 및 0.9초의 휴지기를 갖는 피로시험을 순차적으로 진행하게 되는데, 본 시험에서는 휴지기를 적용하지 않고 0.1초의 하중을 연속으로 재하 하여 실험을 실시하였다. 이는 순수한 피로수명을 예측하기보다는 휴지기를 적용하지 않아 시간에 따른 시편의 상대적인 피로수명을 비교하기 위해 시험을 수행한 것이다.

아스팔트 혼합물의 피로수명을 평가하는 가장 일반적인 방법은 혼합물에 대해 피로시험을 수행하여 얻어진 데이터로부터 강성(stiffness)을 계산하고 이를 통해 시편의 강성이 초기 강성의 50% 도달했을 때까지 시편에 가해진 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식, 그리고 하중재하회수에 따른 변형을 진폭의 변화를 그래프로 그린 다음 최소 곡률반경이 되는 지점의 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식이 있다. 하지만 변형을 진폭에 의한 방법은 최소 곡률반경 지점을 명확히 파악하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 시편의 강성이 초기 강성의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중회수를 피로수명으로 결정하였다.

각 혼합물의 피로시험 데이터를 사용하여 100번째 하중재하시의 변형을 진폭과 피로수명에 대해 식 (1)과 같이 일반적인 피로수명 모델을 사용하여 회귀분석을 수행하였으며, 각 혼합물에 대한 회귀분석 값은 표 6에 나타내었다.

$$N_f = a(\epsilon_0)^b \tag{1}$$

여기서, N_f = 아스팔트 혼합물의 피로수명

ϵ_0 = 초기 인장 변형률

a, b = 회귀분석을 통하여 얻어지는 상수

표 6. 각 혼합물에 대한 회귀분석 결과

혼합물 종류	피로모델식의 계수		
	a	b	R ²
기준 혼합물	2×10^{-10}	-2.7648	0.9364
신규 혼합물	2×10^{-9}	-2.3372	0.9857

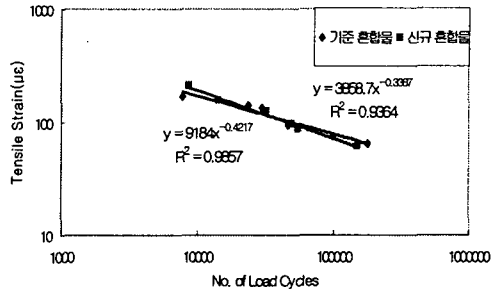


그림 5. SBS 개질 아스팔트 혼합물의 피로수명 비교

그림 5에서 보는바와 같이 기준 혼합물과 신규 혼합물의 피로수명은 유사한 것으로 나타났다.

4.2 휠트래킹 시험

소성변형에 대한 공용성을 분석하기 위하여 2종의 SBS 개질 혼합물에 대하여 휠트래킹 시험을 실시하였다. 686N의 윤하중을 가하여 각각의 혼합물에 대하여 시험을 수행하였으며, 기준 및 신규 혼합물에 대하여 동적안정도를 산정해 소성변형의 저항성을 상대 비교 하였으며, 결과는 표 7과 같다.



표 7. 운하중 686N에서의 동적안정도 비교

	기준 혼합물	신규 혼합물
러팅 발생량 (mm)	2.11	1.08
동적안정도 (회/mm)	5,727	7,000

표 7에서 보는 바와 같이 두 혼합물 모두 동적안정도가 표층의 기준치인 3,000(회/mm)을 크게 상회하는 것으로 나타났다. 두 혼합물 모두 소성변형에 대한 저항성이 매우 우수한 것으로 나타났으며, 신규 혼합물이 동적안정도가 기준 혼합물에 비해 약 22% 큰 것으로 나타났다.

4.3 접착인장강도 시험

아스팔트 혼합물과 강상판간의 부착성능을 평가하기 위하여 신규 및 기준 혼합물을 사용하여 강상판과의 부착성능을 평가하였다. 시험결과를 그림 6에 나타내었고, 신규 혼합물이 기준 혼합물에 비해 접착인장강도가 약 19% 높게 나타났다.

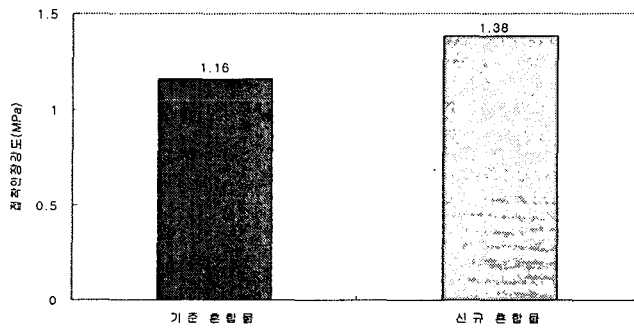


그림 6. 접착인장강도 시험결과

4.4 저온 휨 시험

혼합물의 균열에 대한 저항성을 평가하기 위하여 -10℃, 0℃, 10℃에서 저온 휨 시험을 실시하였다. 표 8은 기준 및 신규 혼합물의 파괴시 휨강도와 변형률을 나타낸 것이다. 시험 결과를 살펴보면, 저온에서의 파괴시 휨강도는 -10℃에서는 두 혼합물 모두 유사한 것으로 나타났으나 0℃, 10℃에서는 신규 혼합물의 휨강도가 기준 혼합물에 비해 약 10%, 50% 증가한 결과가 나타났다. 파괴시의 변형률은 10℃를 제외한 온도에서 신규 혼합물이 기준 혼합물 보다 크게 나타났다.

표 8. SBS 개질 아스팔트의 휨강도와 변형률

혼합물종류	시험온도(℃)	평균 변형률	평균휨강도(MPa)
기준 혼합물	-10	0.00682	26.63
	0	0.00692	20.1
	10	0.0115	11.2
신규 혼합물	-10	0.00812	26.63
	0	0.00723	21.74
	10	0.00998	17.53



5. 결론

본 연구에서는 고내구성 SBS 개질 아스팔트 개발을 위하여 침입도가 높은 (점성이 낮은) 일반 아스팔트에 SBS 함량에 따른 개질 아스팔트 바인더를 생산하여 바인더의 물리적 특성 시험을 실시하였고, 이에 따른 최적의 SBS 함량(SBS 8% 첨가)을 결정하였다.

본 연구에서 개발된 신규 개질 아스팔트(SBS 8% 첨가, PG 82-28) 혼합물과 국내 교면포장에 많이 사용되는 기존 개질 아스팔트(PG 76-22) 혼합물을 제작하여 간접인장 피로 시험, 휠트래킹 시험, 접착인장강도 시험, 저온균열 시험을 실시하였다. 본 연구에서 얻어진 중요한 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 침입도가 100 이상인 기초 아스팔트에 SBS 첨가량을 4%, 5%, 6%, 8%로 변화시킨 개질 아스팔트 바인더에 대하여 다양한 시험을 통하여 SBS 함량이 증가함에 따라 소성변형 저항성 및 피로 저항성이 향상됨을 알 수 있었다.
- SBS가 8% 첨가된 개질 아스팔트 바인더가 모든 시험에서 상대적으로 우수한 공용성을 보이기 때문에 최적 SBS 함량을 8%로 결정하였다.
- 개발된 SBS 개질 아스팔트(SBS 8%)와 기존의 국내에서 사용되는 SBS 개질 아스팔트(PG 76-22)를 사용하여 혼합물을 제작하여 실내 공용성 시험을 실시한 결과, 피로수명은 유사하게 나타났으나, 휠트래킹 시험과 접착인장강도 시험, 저온 휨 시험 결과 신규 혼합물의 성능이 우수한 것으로 나타났다.
- 본 연구의 결과는 실내 물성 및 공용성 시험결과에 국한된 것으로 본 연구에서 개발된 신규 SBS 개질 아스팔트의 장기 공용성을 평가하기 위해서는 포장가속시험 및 현장 시험이 추가로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계 시공기술 개발 사업지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김남호, 박용철, 황성도. "고무계열 개질 아스팔트의 거동 특성 연구" 대한토목학회, 대한토목학회논문집, 19권, III-5호, 873~885, 1999
2. 이수형, 유평준, 유인균, 차순만. "SBS 개질 아스팔트의 현장 공용성 및 효과분석" 대한토목학회, 학술발표회 논문집 281~284, 2000
3. 이현중, 김영수, 차순만. "SBS PMA(슈퍼팔트)의 공용성 및 경제성 평가연구" 최종보고서, 강릉대학교 공학연구소, 2000
4. 이현중, 김현준, 옥창권, 김형배. "SBS 개질 아스팔트를 사용한 SMA 혼합물의 실내 공용성 평가" 대한토목학회 대한토목학회논문집, v.23, 35~41, 2003
5. 박희문, 최지영, 김기현, 박태순, 김지원. "고내구성 교면포장 기술 개발 연구" 3차년도 보고서, 한국건설기술연구원. 2004
6. Maccarrone, C., A. V. Ky, and G.P. Gnanaseelan. "Permanent deformation and fatigue properties of polymer modified asphalt mixes." *Proc. of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, Vol. 2, pp. 1545~1554. 1997*
7. Corte, J.F., Y. Brosseaud and J.P. Kerzreho. "Study of rutting of wearing courses on the L.C.P.C. test track." *Proc. of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, Vol. 2, pp. 1555~1568. 1998*
8. Airey, G. and S. Brown. "Rheological performance of aged polymer modified binders." *Jr. of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 67, pp. 66~100. 1998*