



고내구성 교면포장 아스팔트 혼합물의 공용성 평가에 관한 연구

Performance Evaluation of the High Durability Asphalt Mixture for Bridge Deck Pavements

박 희 문* 최 지 영** 이 현 중*** 황 의 윤****
Park, Hee Mun Choi, Ji Young Lee, Hyun Jong Hwang, Eui Yoon

Abstract

Recently, the pavement distresses in the bridge deck have seriously affected the durability of bridge deck and driver's safety. The existing asphalt materials have the limitations in reducing the pavement distresses of bridge deck. To protect the bridge deck and withstand the high deflection, it is necessary to develop the asphalt materials with good fatigue resistance for bridge deck pavement. The asphalt binder combined with SBS and two other admixtures has been developed for improving the resistance to fatigue cracking, productivity, and workability for bridge deck pavement. Based on the various binder test results, the developed binder is found to be PG 70-34 indicating very higher resistance against fatigue cracking. Fatigue testing, wheel tracking testing, and moisture susceptibility testing have been conducted to evaluate the performance of asphalt mixtures developed in this study. Laboratory test results show that the developed asphalt material has three times higher fatigue lives than the typical modified asphalt mixture. Full scale accelerated testing was also performed on the typical asphalt mixture and newly developed asphalt mixture to evaluate the full scale performance of asphalt mixtures. Test results indicate that the length of cracking on the new materials is only 38% of the typical material at the 250,000 load repetitions.

Keywords : FRP bridge deck, SBS modified asphalt, fatigue crack, full scale accelerated testing

요 지

최근 국내에서는 교면포장의 파손에 따른 교량 바닥판의 열화 및 운전자 안정성의 문제가 대두되고 있다. 기존 아스팔트 재료는 교량에서 발생하는 열악한 환경에 적용하기에는 한계가 있어 교량 바닥판을 보호하고 상대적으로 큰 처짐에 대하여 장기간 견딜 수 있는, 피로저항성이 우수한 고내구성 교면포장 아스팔트 혼합물의 개발이 필요하게 되었다. 이에 SBS 첨가물과 첨가제를 사용하여 생산성 및 작업성이 우수하고 피로균열저항성이 뛰어난 교면포장용 아스팔트 바인더를 개발하였다. 새로운 아스팔트 바인더는 회전점도시험(RV test), 인화점시험(Flash point test), 동적전단시험(DSR test), 저온범시험(BBR test) 등을 통하여 PG 70-34의 공용등급으로 확인되었다.

본 연구에서 개발된 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물의 공용성을 평가하기 위하여, 피로시험, 휠트래킹시험, 수분손상시험 등을 실시하였으며, 실물크기의 운하중시험을 통하여 소성변형 저항성 및 피로균열 저항성에 대하여 평가하였다. 실내공용성 시험을 통하여 교면포장용 아스팔트 혼합물이 SBS 개질 혼합물에 비하여 3배 이상의 피로수명을 가졌다. 또한, 운하중시험에서도 소성흐름이 발생하지 않았고, 피로균열은 250,000회 이상을 재하하여도 PG 64-22 혼합물의 38% 밖에 나타나지 않았다.

핵심어 : FRP 교량상판, SBS 개질아스팔트, 피로균열, 실물포장 가속시험

* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원
 ** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원
 *** 정회원 · 세종대학교 토목공학과 부교수
 **** 정회원 · SK(주)기술원 수석연구원



1. 서론

최근 국내에서는 교량구조물의 경량화 및 고내구성 확보를 위하여 FRP(Fiber Reinforced Plastic) 재료를 사용한 교량상판의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. FRP 바닥판의 경우 기존 콘크리트 바닥판 또는 강상판 교량에 비해 경량일뿐만 아니라 철근이나 강상판의 부식문제를 근본적으로 해결할 수 있어 구조물의 장기적 내구성 확보 측면에서 유리한 것으로 판단된다. 그러나 FRP 자체는 햇빛에 장시간 노출될 경우 내구성이 떨어질 뿐만 아니라 미끄럼 저항성이 부족하여 반드시 교면포장을 시공해 FRP 바닥판을 보호하고 미끄럼 저항성을 확보해야 한다. 또한, FRP 재료는 일반적으로 탄성계수가 콘크리트 및 철에 비하여 상당히 작은 값을 갖기 때문에 하중이 가해질 경우 처짐이 많이 발생한다. 따라서 FRP 바닥판에 적용될 교면포장 재료는 반복되는 교통하중으로 인한 상대적으로 큰 처짐에 장기간 견딜 수 있도록 피로저항성이 우수한 재료여야 한다.

현재 국내외적으로 교면포장 재료로 가장 많이 적용되고 있는 아스팔트의 경우 피로 및 소성변형 저항성을 향상시키기 위하여 다양한 개질재를 개발하여 첨가하고 있다. 다양한 개질재 가운데 최근 가장 신뢰성이 높은 개질재로는 SBS(Styrene-Butadiene-Styrene) 계열의 폴리머를 들 수 있다. 일반적으로 SBS 함량을 높이면 아스팔트의 피로저항성은 향상되나 점도가 상승하여 생산성 및 작업성이 떨어진다. 따라서 대부분 기존의 국내 SBS 개질 아스팔트는 침입도 60~80인 기초바인더에 SBS를 3~4% 첨가하여 생산하고 있다.

본 연구에서는 SBS 함량과 첨가제의 양과 종류를 조절하여 피로 및 소성변형 저항성은 개선되고 작업성 및 시공성이 우수한 바인더를 개발하였으며, 바인더의 공용성 등급(Performance Grade, PG)과 아스팔트 혼합물의 실내공용성과 실물크기의 시험을 통한 현장공용성을 평가하고자 한다.

2. 바인더 시험

기존의 SBS 개질아스팔트 바인더는 일반적으로 일반아스팔트 바인더(PG 64-22)에 SBS 3~4%와 첨가제를 첨가하여 생산하게 된다.

일반적으로 SBS를 많이 첨가할수록 개질아스팔트의 소성변형 저항성은 향상되나 점도가 상승하여 생산성 및 작업성이 현저히 떨어지게 된다.

본 연구에서 교면포장의 적용을 위하여 개발된 아스팔트 바인더는 일반 아스팔트에 SBS첨가제, 균열에 대한 저항성을 증대시키기 위한 첨가제, 그리고 각 요소를 화학적으로 결합시키기 위한 첨가제를 첨가하였다.

교면포장용 SBS 개질 아스팔트 바인더의 공용성 등급을 평가하기 위하여 일반 아스팔트 바인더(PG 64-22)와 SBS 개질 아스팔트 바인더(PG 76-22)를 비교 실험하였다.

2.1 공용성 등급 규격에 의한 평가

(1) 회전점도(Rotational Viscometer), 인화점(Flash Point) 시험 및 결과

회전 점도계를 이용한 아스팔트의 점도측정시험은 가열·혼합 플랜트에서 아스팔트를 이송하고 골재와 혼합할 때 아스팔트의 작업성을 측정하고 평가하는데 유용하게 사용된다.

본 연구에서는 ASTM D 4402(KS F 2392)에 따라 135℃에서 회전점도시험을 실시하였다. 교면포장용 SBS 개질 아스팔트 바인더의 경우 슈퍼페이브의 점도기준(3,000cP 이하)보다 작은 1,875cP로 나타나 플랜트에서의 생산성 및 작업성이 매우 뛰어나음을 알 수 있다.

인화점은 기체 또는 휘발성 액체에서 발생하는 증기가 공기와 섞여서 가연성 또는 완폭발성(緩爆發性) 혼합기체를 형성하고, 여기에 불꽃을 가까이 댈 때 순간적으로 섬광을 내면서 연소하는, 즉 인화되는 최저의 온도를 말하는 것으로 ASTM D



92(Cleveland Open Cup, KS M 2010)에 따라 실시하였다. 시험결과 슈퍼페이브 규격(230℃)을 상회하는 320℃로 나타나 안정성도 기준을 만족하였다.

(2) 소성변형에 대한 저항성

소성변형에 대한 저항성 시험은 원 아스팔트 바인더와 단기노화 후의 아스팔트 바인더에 대하여 동적전단시험(Dynamic Shear Rheometer test)을 통하여 실시한다. 동적전단시험은 공용중인 아스팔트 바인더의 점성과 탄성거동 특성을 분석하는데 사용되며, 복소전단계수(G^*)와 위상각(δ)을 측정함으로써 포장의 공용온도에서 아스팔트의 물성변화에 대하여 파악할 수 있다. 본 연구에서는 AASHTO TP5에 규정되어 있는 방법에 따라 동적시험기를 이용하여 아스팔트의 복소전단계수와 위상각을 측정하였으며, 70℃의 온도에서 노화되지 않은 상태, RTFO시험(Rolling Thin Film Oven test)을 거친 단기노화된 상태에서 시험을 실시하였다.

표 1에서 교면포장용 SBS 개질 아스팔트 바인더의 소성변형인자($G^*/\sin\delta$)의 변화에 따른 소성변형 거동 특성을 분석하기 위하여 기존 PG 64-22와 PG 76-22 바인더 시험결과와 비교하였다. 슈퍼페이브에 의하면 $G^*/\sin\delta$ 값이 클수록 소성변형에 대한 저항성이 우수한 것으로 간주한다. 원 시료의 경우, 교면포장용 SBS 개질 아스팔트 바인더가 일반적인 PG 64-22 바인더에 비하여 소성변형에 대한 저항

성이 뛰어남을 알 수 있지만, PG 76-22 바인더와 비교하면 다소 소성변형에 대한 저항성이 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나, 본 연구에서 개발하고자 하는 아스팔트 바인더는 교면포장용 아스팔트로 균열 저항성에 초점을 두었고, 고온영역인 70℃에서 PG 규정을 만족하였다.

(3) 피로 및 저온균열에 대한 저항성 시험 및 결과

피로균열의 저항성을 측정하기 위한 동적전단시험은 압력노화시험(Pressure Aging Vessel test)을 거친 아스팔트 바인더를 사용하는데, 압력노화시험은 공용중인 아스팔트 포장의 장기노화를 모사하기 위함이다. PAV시험에 사용되는 아스팔트는 RTFO에서 단기노화를 거친 아스팔트를 사용한다. 피로균열의 저항성을 나타내는 피로인자는 $G^*\sin\delta$ 를 사용하며, $G^*\sin\delta$ 값이 감소해야 피로저항성이 커지므로 G^* 값이 작아지거나 δ 이 작아야 한다. 압력 노화 후 동적전단시험을 22℃에서 실시하였다.

표 2는 슈퍼페이브에서 제안한 아스팔트 바인더의 공용성 규격에서 피로수명인자인 $G^*\sin\delta$ 의 온도와 바인더 종류에 따른 거동 특성을 분석한 것이다. 모든 장기노화 시료가 시험온도에서 5,000kPa 이하로 규정을 만족하였으나, 본 연구에서 개발된 교면포장용 SBS 개질 아스팔트 바인더의 경우 장기노화 후 피로균열에 대한 저항성이 감소하지 않았으며, 다른 바인더에 비하여 피로균열에 대한 저항성이 12배 이상 월등히 우수함을 알 수 있다.

표 1. 단기노화 전후의 온도에 따른 $G^*/\sin\delta$ 변화

구 분	바인더 종류	$G^*/\sin\delta$
소성변형저항응력, $G^*/\sin\delta$ (kPa) 1.0 kPa 이상 (Test Temp 70℃)	PG 64-22	0.63
	PG 76-22	2.38
	신규 바인더	1.91
박막가열 노화후 (Rolling Thin Film Oven 또는 Thin Film Oven Residue)		
소성변형저항응력, $G^*/\sin\delta$ (kPa) 2.2 kPa 이상 (Test Temp 70℃)	PG 64-22	3.04
	PG 76-22	4.97
	신규 바인더	3.00

표 2. 장기노화 후의 바인더 종류에 따른 $G^*\sin\delta$

구 분	기 준	PG 64-22	PG 76-22	신규 바인더
피로균열저항응력 $G^*\sin\delta$, (kPa)	22℃ 5,000 이하	2,525	2,405	201

BBR 시험(Bending Beam Rheometer test)은 저온균열에 대한 아스팔트 바인더의 저항성을 측정하기 위하여 바인더를 매우 낮은 온도에서 시험을 실시한다.



BBR 시험은 AASHTO TP1의 시험절차에 따라 -12℃, -18℃, -24℃ 등의 세 온도에서 시험을 실시한다. 그러나, 본 신규 바인더는 고점도 바인더로 균열 저항성에 초점을 두어 개발하였으므로 -24℃ 온도에서만 시험을 실시하였다. BBR 시험을 통하여 크리프 스티프니스(S(t))와 m-value 값을 구할 수 있으며, 크리프 스티프니스는 일정한 하중 하에서의 아스팔트 강성을 나타내는 물성이다. m-value는 점탄성 물성의 하나로서 시험재료의 점탄성 특성을 평가하는 지표이다.

일반적으로 S(t)가 낮은 재료일수록 저온균열에 유리한 것으로 평가되고 있다. m-value는 S(t)와 시간의 대수관계곡선의 기울기를 나타내는 인자로서, 재료가 탄성적인 거동을 할수록 하중재하시간의 변화에 따른 스티프니스의 변화가 적기 때문에 m은 0에 가까운 값을 갖게 된다. 따라서 m값이 큰 재료일수록 보다 점성에 가까운 거동을 하게 되고 응력을 완화시키는 성질이 많아 저온균열에 유리하다고 할 수 있다. 따라서 슈퍼페이브 규격에서는 S(t)=300 MPa 이하, m=0.3 이상으로 규정하고 있다.

표 3의 시험결과를 살펴보면, 저온에서의 강성은 188 MPa로 기존 바인더에 비하여 현저히 감소함을 알 수 있었고, 강성이 작을수록 저온균열에 유리하므로 교면포장용 아스팔트 바인더는 균열이 발생할 확률이 상당히 적은 것으로 판단된다. 본 교면포장용 아스팔트 바인더는 -24℃에서 시험을 실시한 반면, PG 64-22, PG 76-22는 -6℃, -12℃에서 시험을 실시하였다.

개발된 교면포장용 아스팔트 바인더는 PG 64-22

표 3. 바인더 종류에 따른 Creep Stiffness 및 m-Value

시험 온도 (℃)	Stiffness(MPa), 300MPa 이하			m-value, 0.3 이상		
	PG 64-22	PG 76-22	교면포장용 아스팔트바인더	PG 64-22	PG 76-22	교면포장용 아스팔트바인더
-6	75.69	65.76	-	0.42	0.39	-
-12	232.90	181.35	-	0.31	0.32	-
-24	-	-	188	-	-	0.33

나 PG 76-22 바인더보다 낮은 온도인 -24℃에서 시험을 실시하였음에도 불구하고, 저온에서의 균열 저항성이 전혀 불리하지 않음을 알 수 있다. 기존 아스팔트 바인더는 -24℃에서 기준을 만족하지 못하였다. m-value가 클수록 저온균열에 유리하므로 본 신규 바인더의 균열저항성이 우수함을 알 수 있다.

저온균열을 대표하는 장기노화 후 크리프 스티프니스 항목을 측정된 결과 PG 등급 규격을 충족하는 등급상의 최저온도는 -34℃로 나타났고, DSR 시험에서 단기노화 전·후의 온도에 따른 $G^*/\sin\delta$ 변화 측정결과 최고온도는 70℃로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 개발된 고내구성 교면포장용 아스팔트 바인더의 슈퍼페이브 아스팔트 바인더 등급은 PG 70-34으로 결정되었다.

3. 실내 공용성 평가

3.1 배합설계

아스팔트 바인더는 바인더 시험에 사용한 3종(PG 64-22, PG 76-22, PG70-34(교면포장용 아스팔트 바인더))을 사용하였으며, 골재는 국내외적으로 교면포장에 적용사례가 많은 최대공칭치수가 13mm인 밀입도를 사용하여 배합설계를 실시하였다.

밀입도 13mm 골재와 3가지 바인더를 사용하여 배합설계를 실시하였고, 교면포장의 아스팔트층 혼합물의 마찰배합설계 기준은 공극률 4%에서 최적 아스팔트 함량을 결정하였다. 아래의 표 4는 각 혼합물별 최적 아스팔트 함량(Optimum Asphalt Content, OAC)를 나타낸 것이다.

표 4. 최적 아스팔트 함량(OAC)

혼합물 종류	OAC
밀입도 13mm + PG 64-22	5.0 %
밀입도 13mm + PG 76-22	4.8 %
밀입도 13mm + PG 70-34	5.5 %



3.2 피로시험

본 연구의 실내 피로시험을 위한 시편제작에 사용된 모든 아스팔트 혼합물은 아스팔트 믹서기를 사용한 기계식 비빔으로 혼합하였으며, 선회다짐기를 사용하여 직경 150mm, 높이 70mm의 원통형 시편을 제작하였다. 간접인장 피로시험을 위하여 코어 및 커팅을 하여 직경 100mm, 높이 50mm의 시편을 제작하여 사용하였다.

피로시험은 20℃에서 실시하였고, 하중은 10Hz의 주기를 갖는 Haversine파를 일정하게 시편에 재하하였다. 3개의 다른 하중레벨에서 피로시험을 실시하고, 각 하중레벨별 최소 2회 이상 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 혼합물의 상대적인 피로수명을 단기간에 규명하기 위하여 휴지기를 적용하지 않고 0.1초의 하중을 연속재하 하였다.

아스팔트 혼합물의 피로수명을 평가하기 위하여, 시편의 강성이 초기강성의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중횟수를 피로수명으로 결정하였다.

간접인장 피로시험의 경우 시편에 일정한 크기의 진폭을 가진 압축하중을 반복재하하는 방식이지만 2축 응력상태이기 때문에 포아송비에 따라 응력이 변하게 된다. 시편이 선형 점탄성 범위내에 존재할 경우에는 포아송비가 일정하지만 선형 점탄성 범위를 벗어날 경우에는 시편에 발생하는 손상에 의해 포아송비가 증가하게 된다. 그러나 포아송비를 정확히 실험을 통하여 실측하기는 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 포아송비는 0.35로 일정한 것으로 가정하여 강성을 계산하였다.

시편의 표면 중심에 발생하는 수평변형률과 수평응력, 수직응력은 한국형 포장설계법(2003)에서 개발한 식을 사용하였다. 각 혼합물의 피로시험 데이터를 사용하여 100번째 하중재하시의 변형률 진폭과 피로수명에 대해 식 (1)과 같이 일반적인 피로수명 모델식을 사용하여 회귀분석을 실시하였다. 그림 1은 아스팔트 혼합물의 피로수명을 비교한 결과이고, 표 5는 각 혼합물에 대한 회귀분석 값들이다.

$$N_f = a(\epsilon_0)^b \quad (1)$$

여기서, N_f = 아스팔트 혼합물의 피로수명

ϵ_0 = 초기인장 변형률

a, b = 회귀분석을 통하여 얻어지는 상수

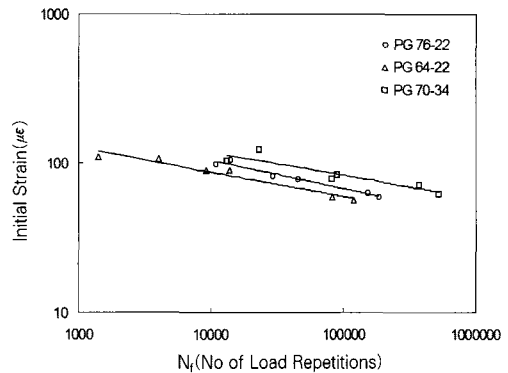


그림 1. 아스팔트 혼합물의 피로수명 비교

그림 1에서 보는 바와 같이 고내구성 교면포장용 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물의 피로수명은 PG 64-22 혼합물에 비하여 4배 이상의 피로수명을 나타내고 있을 뿐만 아니라, PG 76-22 혼합물에 비해서도 2.5배 이상의 피로수명을 나타내 피로균열 저항성이 월등히 우수함을 알 수 있었다.

표 5. 각 혼합물에 대한 회귀분석 결과

혼합물 종류	공극율 평균(%)	피로모델식의 계수		
		a	b	R ²
13mm 밀입도+PG 64-22	3.64	2×10^{-15}	-5.8824	0.9364
13mm 밀입도+PG 76-22	3.71	2×10^{-14}	-5.0647	0.9718
13mm 밀입도+PG70-34	3.01	3×10^{-15}	-5.4570	0.8498

3.3 휠트래킹 시험

휠트래킹 시험은 하절기에서와 같은 고온의 포장 조건하에서 실제 차량하중이 통과함에 따라 발생하



기 쉬운 소성변형을 실내에서 재현하여 평가하는 속성시험으로, 반복주행으로 인한 바퀴패임 깊이의 변화를 측정함으로써 아스팔트 혼합물의 동적안정도(Dynamic Stability)를 결정할 수 있다. 소성변형에 대한 공용성을 분석하기 위하여 각 혼합물에 대한 휠트래킹 시험을 실시하였다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 시험방법인 686N의 운하중을 가하여 각각의 혼합물에 대하여 시험을 수행하였으며, 시험이 진행되는 동안 1분, 5분, 10분, 15분, 30분, 45분, 60분마다 운하중 재하횟수와 소성변형 깊이를 기록하였다.

휠트래킹 시험에 사용한 시편은 크기 300×300×50mm인 슬래브형 시편으로서, 휠트래킹 다짐기를 사용하여 공극률이 각 혼합물의 목표 공극률에 적합하도록 제작하였다.

휠트래킹 시험을 통해 각 혼합물에 대하여 동적안정도를 산정해 소성변형의 저항성을 상대 비교하였다. 표 6에서 보는 바와 같이 각 혼합물에 대한 동적안정도를 비교분석해본 결과 PG 64-22를 사용한 혼합물을 제외하고, PG 76-22, 교면포장용 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물의 동적안정도가 표층의 기준치인 3,000(회/mm)을 상회하는 것으로 나타났다.

표 6. 각 혼합물의 동적안정도 (운하중 686N)

		13mm 밀입도 + PG 64-22	13mm 밀입도 + PG 76-22	13mm 밀입도 + PG 70-34
동적안정도 (회/mm)	1차	2,488	5,727	3,043
	2차	2,333	5,780	3,150
평균 동적안정도		2,411	5,754	3,097

3.4 수분손상 시험

피로균열 및 소성변형과 더불어 혼합물의 수분손상은 아스팔트 교면포장의 가장 흔한 손상유형 중의 하나이다. 이러한 수분손상의 가장 큰 원인은 아스팔트와 골재의 피막박리에 기인하는 것으로서 이러한

피막박리는 아스팔트 층의 하부에서 먼저 발생되어 상부로 진전된다. 피막박리 현상이 심하게 발생하면 포장의 지지력을 상실하여 과도한 소성변형이 발생되기도 하고 포트홀(pot hole)을 유발시키기도 한다. 따라서 본 연구에서는 혼합물의 수분손상에 대한 평가를 실시하였다.

수분손상 시험에 사용된 시편은 직경 100mm, 높이가 약 70mm의 마샬 다짐 시편을 사용하였으며, ASTM D4867-92의 규정에 따라 시험을 실시하였다. 이 시험법은 AASHTO T283-89 시험법과 거의 유사하나, ASTM 규정에서는 동결처리가 선택사항인데 반해 AASHTO에서는 의무사항으로 되어있다. 우리나라에서 발생하는 수분에 의한 포장의 손상은 주로 여름철 우기에 집중되고 있기 때문에 본 연구에서는 동결처리를 하지 않고 시험을 실시하였다.

각 혼합물 당 6개의 시편을 마샬다짐기를 사용하여 공극률 7±1%가 얻어지도록 다짐을 실시한 후, 60℃에서 24시간, 25℃에서 1시간동안 수침시킨 시편과 25℃에서 20분간 수침시킨 시편의 간접인장강도를 측정하여 각 혼합물에 대한 수분저항성을 측정하였다.

식 (2)는 간접인장강도비(Tensile Strength Ratio, TSR)를 나타내는 식으로, 혼합물의 수분손상에 대한 저항성은 TSR 값이 클수록 유리하다고 할 수 있다.

$$TSR(\%) = \frac{Wet\ Strength}{Dry\ Strength} \times 100 \quad (2)$$

미국의 대부분의 주에서는 아스팔트 혼합물의 배합 설계시 수분손상에 대한 평가를 실시하도록 규정하고 있으며, 많은 경우 TSR이 80% 이상이 되어야 합격으로 간주된다(NCDOT Standard Specifications Books, INDOT Standard Specifications Books).

표 7은 각 혼합물에 대한 간접인장강도비를 측정 한 결과이며, 표에서 보는 바와 같이 PG 64-22를 사용한 혼합물을 제외한 혼합물 모두 간접인장강도비가 시방기준인 80%를 상회하였다. 특히 본 연구

표 7. 수분손상 시험에 의한 간접인장강도비(TSR)

ID		평균강도 (kg/cm ²)	TSR (%)
13mm 밀입도 + PG 64-22	건조	4.39	55.44
	수침	2.43	
13mm 밀입도 + PG 76-22	건조	8.17	83.87
	수침	6.85	
13mm 밀입도 + PG 70-34	건조	5.22	98.17
	수침	5.13	

에서 개발된 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물의 간접인장강도비가 98% 이상으로 수분에 의한 강도저하가 거의 나타나지 않은 것을 알 수 있었다.

3.5 저온 휨 시험

교면포장용 혼합물의 저온에서의 균열에 대한 저항성을 평가하기 위하여 그림 2와 같은 휨 시험장치를 사용하여 -10℃, 0℃, 10℃에서 휨 시험을 실시하였다. 강상판의 지간 길이는 강상판의 U리브 사이의 간격인 20cm로 동일하게 적용하였다.

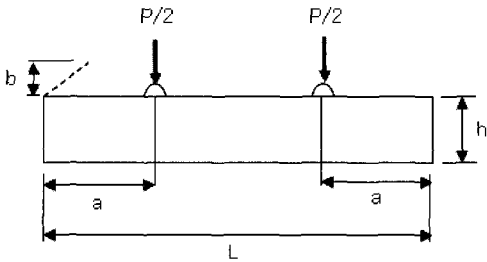


그림 2. 2점 휨 시험장치 단면도

저온 휨 시험에 사용된 시편은 휠트래킹 다짐장비를 사용하여 300mm×300mm×50mm의 슬래브 시편을 제작한 다음 300mm×50mm×50mm의 크기로 절단하여 휨 시험에 사용하였다.

3종류의 혼합물 모두 온도가 증가함에 따라 휨강도는 감소하였고 변형률은 증가하였다. 표 8은 각 혼합물의 파괴시 휨강도와 변형률을 나타낸 것이다. 시

표 8. 혼합물별 휨강도와 변형률

혼합물 종류	시험온도 (℃)	평균 변형률	평균 휨강도 (MPa)
13mm 밀입도 + PG 64-22	-10	0.0094	9.01
	0	0.0116	8.64
	10	0.0135	6.52
13mm 밀입도 + PG 76-22	-10	0.0119	9.99
	0	0.0129	9.07
	10	0.0186	7.08
13mm 밀입도 + PG 70-34	-10	0.0128	11.54
	0	0.0181	11.11
	10	0.0275	7.58

험결과를 살펴보면 모든 온도에서 PG 70-34 바인더를 사용한 혼합물이 변형률 및 휨강도가 가장 큰 것으로 나타났다. 특히, 0℃, -10℃의 저온에서의 균열 저항성이 다른 혼합물에 비하여 15%~28%까지 증가하였음을 알 수 있다.

터프니스는 변형에 대한 저항성, 즉 변형에너지를 흡수할 수 있는 정도를 나타내는 척도로서 혼합물의 균열저항성을 평가하는 대표적인 측정값이다. 본 연구에서는 저온 휨시험을 통하여 얻은 하중과 변위의 곡선으로부터 터프니스 값을 계산하였다. 하중과 변위곡선에서 극한하중과 파괴시 변위량을 적분한 면적이 터프니스가 된다. 터프니스 값이 클수록 균열에 대한 저항성이 우수하다고 할 수 있다.

표 9는 온도에 따른 각 혼합물의 터프니스를 분석한 결과이다. 모든 혼합물은 온도가 증가함에 따라 터프니스도 증가하였다. PG 70-34 혼합물이 PG 76-22 혼합물과 PG 64-22 혼합물에 비하여 터프니

표 9. 온도에 따른 아스팔트 혼합물의 터프니스

온도(℃)	터프니스(N·m)		
	13mm 밀입도 + PG 64-22	13mm 밀입도 + PG 76-22	13mm 밀입도 + PG 70-34
-10	2.01	2.90	4.80
0	2.30	3.92	12.48
10	4.80	6.78	16.04

스가 크게 나타났다. -10℃에서는 PG 64-22 : PG 76-22 : PG 70-34의 비율이 1 : 1.4 : 2.4의 비율로, 0℃에서는 1 : 1.7 : 5.4, 10℃에서는 1 : 1.4 : 3.3의 비율로 크게 나타났다. 따라서 PG 70-34 바인더를 사용한 혼합물은 기존부터 사용되고 있는 다른 혼합물에 비하여 균열저항성이 상당히 우수한 것으로 판단된다.

4. 운하중 시험

운하중 시험은 포장가속시험기(Accelerated Pavement Tester, APT)의 일종으로서 실험사이즈의 실험체에 실제 축하중을 재하하여 실제와 유사한 방법으로 짧은 시간안에 포장체에 파손을 유발시킬 수 있다. 현재 한국건설기술연구원에서 개발하여 운영하고 있는 운하중시험기는 유압으로 100톤까지 하중을 재하할 수 있으며, 다양한 차륜(철륜, 타이어)을 장착하여, 3m까지 왕복주행이 가능하다. 본 연구에서는 FRP 바닥판위에 아스팔트 포장을 시공하여 운하중시험을 실시하였다. 하중재하는 5톤의 하중을 복륜타이어로 재하하였고, 689.47kPa(100psi)의 접지압으로 상온에서 시험을 실시하였다.

4.1 운하중 시험시편

운하중 시험에 사용될 바닥판은 한국건설기술연구원에서 개발한 3m×3m의 FRP바닥판을 사용하였으며, 단면구성은 아래의 그림 3과 같이 하였다. 시편에 사용된 아스팔트 혼합물은 13mm 밀입도 골재에 PG 64-22, PG 70-34 2가지 바인더를 사용하여 제작하였다.

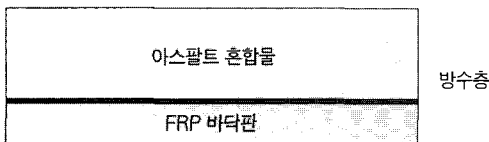


그림 3. 운하중 시험시편 단면구성

FRP 바닥판과 아스팔트 포장층 사이에는 방수이외에 접착성, 전단저항성 등의 문제가 큰 만큼 방수층으로는 규사와 에폭시 수지를 이용한 접착공법을 사용하였다. 그림 4는 접착층의 단면구성으로서 바닥판위에 프라이머 층을 시공 후 규사층을 두고 그위에 다시 접착층을 두어 아스팔트 혼합물 층과의 접착성이 매우 우수하게 하였다. 에폭시수지를 이용한 접착공법은 한국도로공사의 전단시험결과(2000)를 보면 전단응력이 강상판과 콘크리트 바닥판위에 도막방수재나 시트방수재를 시공하였을 때 보다 우수한 것으로 나타났다.

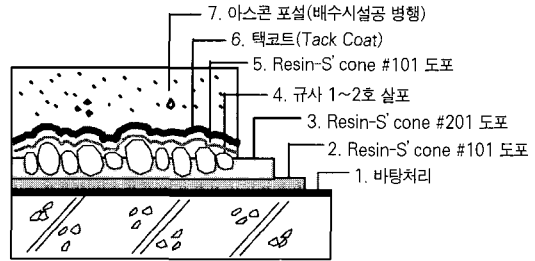


그림 4. 접착층 단면구성

4.2 운하중 시험 결과 및 분석

본 연구의 목적은 FRP 교면포장에서의 피로균열 파손에 대한 시험으로 상온에서 실시하였으며, 주기적으로 포장체 내부 온도를 Thermocouple을 이용하여 계측하였으며 시험온도는 20~25℃이다. 그림 5는 운하중시험기의 시험장면이다.

매 20,000회 하중재하마다 시험기를 멈추고 프로파일러로 소성변형을 측정하고, 육안으로 피로균열을 측정하여 흰색으로 색을 칠하여 기록하였다. 그림 6은 소성변형 측정에 사용된 프로파일러로서, 횡방향 3cm마다 모눈종이 한눈금으로 표현되게 세팅되어 있었다. 그림 7은 피로균열을 육안으로 측정하는 모습이다.

그림 8과 그림 9는 프로파일러로 측정한 소성변형량을 나타낸 것이다. 하중재하 전의 초기상태를 뺀

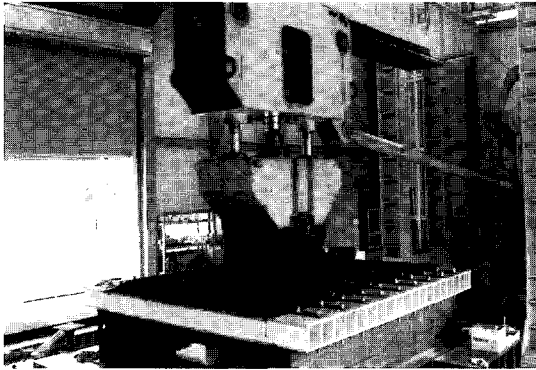


그림 5. 운하중 시험장면

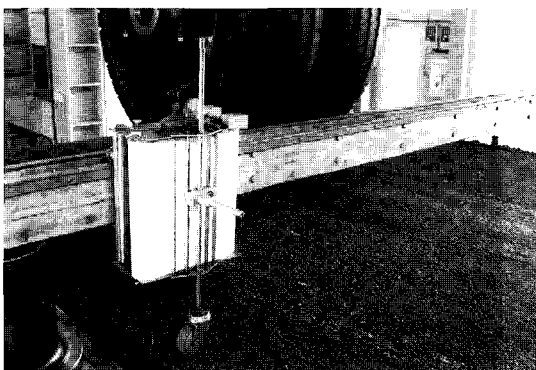


그림 6. 소성변형량 측정



그림 7. 피로균열 측정

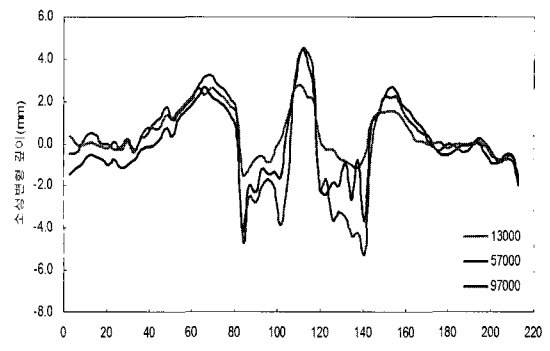


그림 8. 밀입도 13mm + PG 64-22 혼합물의 소성변형량

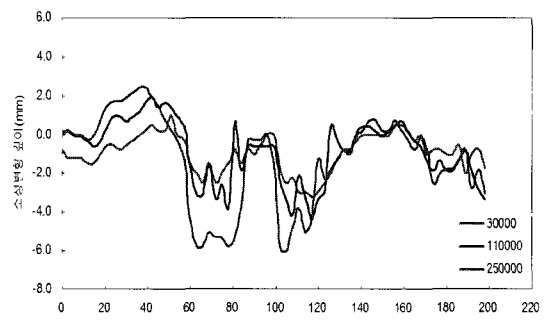


그림 9. 밀입도 13mm + PG 70-34 혼합물의 소성변형량

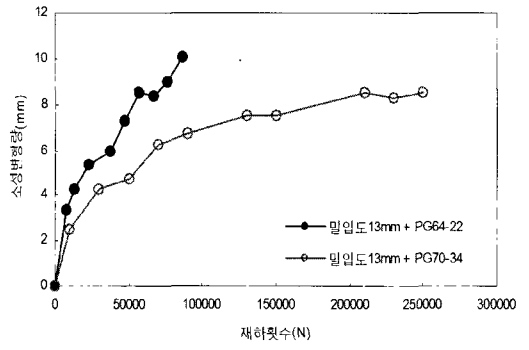


그림 10. 하중재하횟수에 따른 최대 소성변형 깊이

값으로, 하중재하횟수가 증가함에 따라 소성깊이가 깊어짐을 알 수 있다.

PG 64-22 아스팔트 혼합물은 하중재하 초기부터 전단파괴에 의한 소성흐름이 발생하여 운하중 재하면의 좌우로 기준면보다 부푸름현상이 시작하였지만, PG 70-34 혼합물은 압밀에 의한 소성변형만 발

생하였다. 그림 10은 하중재하횟수에 따른 최대 소성변형 깊이를 나타낸 것으로, PG 64-22 혼합물에 비하여 PG 70-34 혼합물의 소성변형량이 재하횟수 10,000회의 경우 약 50% 더 작게 나타났다. 이는 PG 70-34 혼합물이 소성변형 저항성이 PG 64-22 보다 우수하다는 것을 나타낸다.

1. 교면포장용 아스팔트 바인더의 작업성 및 생산성을 판단하기 위한 135℃에서의 회전점도시험에서도 슈퍼페이브 기준(3,000cP) 보다 작은 1,875cP로 생산성 및 작업성이 뛰어난 것으로 나타났다. 소성변형에 대한 저항성을 알아보기 위한 동적전단 시험(DSR)에서는 소성변형 인자($G^*/\sin\delta$) 값이 SBS 개질 아스팔트(PG 76-22)에 비하여 다소 떨어지는 것으로 나타났으나, 개발된 아스팔트 바인더는 교면포장 하층용 아스팔트로 균열저항성에 초점을 두었고 슈퍼페이브 규정을 상회하는 결과였다.
2. 피로균열 저항성을 평가하기 위하여 압력노화(PAV)시험을 실시하여 동적전단시험을 실시하였다. 피로균열 인자인 $G^*\sin\delta$ 값이 기존의 바인더에 비하여 10배 이상 현저히 작은 값을 나타내 피로균열에 대한 저항성이 상당히 우수한 것으로 나타났다.
3. 슈퍼페이브 바인더 시험 결과를 종합한 결과, 새로 개발된 아스팔트 바인더의 공용성 등급은 PG 70-34로 결정되었으며, 특히 저온에서의 피로균열에 우수한 것으로 나타났다.
4. 간접인장 방식을 활용한 피로시험결과 기존의 혼합물에 비하여 월등히 뛰어났으며, PG 76-22 혼합물에 비해서도 피로수명이 3배 이상으로 나타났다. 수분손상시험에서 간접인장강도비(TSR)이 98.2%로 수분에 대한 저항성이 기존 혼합물에 비하여 월등히 우수하게 나타났다.
5. 저온휨 시험에서도 교면포장용 아스팔트 바인더 혼합물의 모든 온도에서 휨강도가 크게 나타났으며, 특히 0℃, -10℃에서의 균열저항성이 우수하게 나타났다.
6. 운하중시험 결과, 교면포장용 아스팔트 바인더 혼합물이 소성흐름이 발생하지 않고 소성변형 증가율이 더 작아 소성변형 저항성이 더 우수한 것으로 나타났다. 소성변형량은 하중재하횟수 90,000회를 기준으로 기존 아스팔트 혼합물에 비하여 36% 감소하였다.

8. 운하중 시험을 통한 피로균열 저항성은 PG 64-22 혼합물은 50,000회를 넘어가면서 급격히 피로균열이 증가하였으나, 교면포장용 아스팔트 혼합물은 250,000회 까지 완만한 피로균열 증가율을 보였다. 피로균열량도 기존 아스팔트 혼합물의 38%만 발생하여, 바인더 시험에서와 마찬가지로 피로균열 저항성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

김남호, 박용철, 황성도(1999). "고무계열 개질 아스팔트의 거동 특성 연구" 대한토목학회, 대한토목학회논문집, 19권, III-5호, 873~885

이광호, 옥창권, 김도형(2000). "교면포장재료 및 모사 시험기 개발 연구", 2000년도 연구보고서, 한국도로공사 도로연구소

이수형, 유평준, 유인균, 차순만(2000). "SBS 개질 아스팔트의 현장 공용성 및 효과분석" 대한토목학회, 학술발표회 논문집 281~284

이현종, 김영수, 차순만(2000). "SBS PMA(슈퍼팔트)의 공용성 및 경제성 평가연구" 최종보고서, 강릉대학교 공학연구소

이현종, 김현준, 옥창권, 김형배(2003). "SBS 개질 아스팔트를 사용한 SMA 혼합물의 실내 공용성 평가" 대한토목학회 대한토목학회논문집, v.23, 35~41

박희문, 최지영, 김기현, 박태순, 김지원(2004). "고내구성 교면포장 기술 개발 연구" 3차년도 보고서, 한국건설기술연구원.

Bouldin, M.G. and J.H. Collins (1992). "Influence of Binder Rheology on Rut Resistance of Polymer Modified and Unmodified Hot Mix Asphalt." *ASTM STP 1108*, ASTM, Philadelphia.

Tayebali, A.A., J.L. Goodrich, J.B. Sousa, and C.L. Monismith. (1992). "Influence of the Rheological Properties of Modified Asphalt Binders on the Load Deformation Characteristics of the Binder-Aggregate Mixtures." *ASTM STP 1108*, ASTM, Philadelphia.

Heather, W.P.F. (1992). "Comparative Performance of Polymer Modified Hot Mix and the Practical



Problems of Ensuring Performance." *ASTM STP 1108*, ASTM, Philadelphia.

Srivastava, A., P.C. Hopman, and A.A. Molenaar (1992). "SBS polymer modified asphalt binder and its implications on overlay design." *ASTM PCN04-011080-08*, ASTM, pp. 309-329.

Maccarrone, C., A. V. Ky, and G.P. Gnanaseelan (1997). "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.

Corte, J.F., Y. Brosseaud and J.P. Kerzreho (1998). "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.

Airey, G. and S. Brown (1998). "Rheological performance of aged polymer modified binders." *Jr. of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT*, Vol. 67, pp. 66-100.

Section 400:Bituminous Pavements, Standard Specifications Books, *Indiana Department of Transportation*, 2006 Standard Specifications.

Section 600:Asphalt Pavements, Standard Specifications Books, *North Carolina Department of Transportation*, 2006 Specifications Book.

접 수 일: 2007. 3. 14

심 사 일: 2007. 3. 30

심사완료일: 2007. 4. 16