



황이 첨가된 개질 아스팔트 혼합물의 실내 물성 평가

Laboratory Evaluation of the Properties of Sulfur Modified Asphalt Mixtures

양 성 린* 김 부 일** 김 남 호*** 이 석 근****
 Yang, Sung Lin Kim, Boo il Kim, Nam Ho Rhee, Suk Keun

Abstract

This study evaluated the laboratory properties of asphalt binder and mixture modified with SPC(Sulfur Polymer Cement), which consists of sulfur as a main ingredient that is an industrial by-product made from refining process of crude oil and carbon-black as an additive. Four levels of SPC modifier ratios(0, 10, 30, 50%) were evaluated in the laboratory. Superpave(Superior Performing Asphalt Pavements) system was used to determine the PG(Performance Grade) and evaluate the property of SPC modified binder at the different temperatures. IDT(Indirect Tensile Test) was performed to evaluate the resistance of fatigue and low-temperature cracking at 10°C and -10°C. Wheel-tracking test was also performed to evaluate the rutting-resistance of SPC modified asphalt mixtures. Test results showed that the more SPC modifier ratios, the better rutting-resistance and the more potential of low-temperature cracking resistance. However, SPC modifier did not show the effect on the fatigue cracking resistance.

Keywords : sulfur polymer cement, modified binder, cracking, rutting

요 지

본 연구에서는 원유 정제과정에서 발생하는 산업부산물인 황을 주성분으로 폴리머 성분의 첨가제를 혼합하여 개발된 개질 첨가제인 SPC(Sulfur Polymer Cement:가칭)를 비율별(0%, 10%, 30%, 50%)로 첨가하여 개질 아스팔트 바인더 및 혼합물의 실내 물성 평가를 수행하였다. 개질 아스팔트 바인더의 특성을 평가하기 위해 슈퍼페이브 바인더 시험법을 이용하여 아스팔트 바인더의 PG(Performance Grade) 등급을 분류하고 온도에 따른 특성을 파악하였다. 또한 개질 아스팔트 혼합물의 피로균열 및 저온균열 특성을 평가하기 위해 10°C 및 -10°C에서 간접인장시험(Indirect Tensile Test)을 수행하였으며, 소성변형에 대한 저항성을 평가하기 위해 휠트래킹 실험을 수행하였다. 실험 결과, 개질 첨가제인 SPC의 첨가 비율이 증가할수록 소성변형에 대한 저항성이 증가하는 것으로 나타났으며, 저온 균열 저항성을 증가시킬 수 있는 잠재성을 보여주었다. 그러나 피로균열 SPC는 피로균열 저항성 향상에는 큰 효과가 없는 것으로 나타났다.

핵심용어 : SPC, 개질 아스팔트, 균열, 러팅

* 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 공학사
 ** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사
 *** 정회원 · 한국기술교육대학교 건축공학부 부교수 · 공학박사
 **** 정회원 · 경희대학교 토목건축공학부 토목공학과 · 교수 · 공학박사



1. 서론

1973년 오일 파동 이후, 에너지 위기로 인하여 석유 제품을 생산하는 모든 분야에서 대체 품목을 찾아야만 했고, 건설 분야에서도 많은 변화를 초래하였다. 특히, 아스팔트 시멘트를 주재료로 사용하는 도로 포장의 경우에는 대체 품목을 찾는 것이 매우 시급하였다. 이러한 이유에서 대부분의 연구기관과 정부기관은 막대한 양의 산업부산물로 생산되는 황에 대한 관심이 높아지게 되었고 그것에 대한 연구를 하기 시작하였다.

현재 국내에서는 매년 막대한 양의 원유를 해외에서 수입하고 있으며, 이를 자동차 및 산업용 에너지 원으로 사용하기 위해 다양한 석유 제품들을 생산하고 있다. 이러한 석유 제품의 생산을 위해서는 정유 플랜트에서 정제과정을 거치게 된다. 이 과정에서 탈황과정을 통해 산업부산물의 하나인 황(sulfur)이 발생하고 있다. 현재 전 세계에서 발생되거나 생산되는 황의 양은 2003년을 기준으로 약 650억톤에 이른다. 그 중 미국과 캐나다가 약 55%를 차지하는 것으로 나타났으며, 앞으로 더 증가될 것으로 추정된다. 또한 원유 생산을 할 수 없는 국내에서도 황의 생산량은 막대하여 2001년을 기준으로 70만톤, 2005년에는 약 80만톤이 생산되었다. 이러한 탈황 물질은 다양한 산업분야에 활용되고 있으나, 아직까지 대량 수요처가 필요한 실정이다. 따라서 대량 물량이 투입되는 건설분야의 활용을 위한 새로운 기술개발의 필요성이 제기되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 원유의 정제과정에서 발생하는 산업부산물인 황(sulfur)을 주성분으로 폴리머 성분의 첨가제를 혼입하여 개발된 개질 첨가제인 SPC(Sulfur Polymer Cement; 가칭)가 아스팔트 혼합물에 미치는 영향을 실내 실험을 통하여 평가하고자 한다.

2. 문헌 고찰

1973년의 오일 파동으로 인해 발생한 에너지 위기

는 포장 시공 및 유지관리를 위해 사용되는 아스팔트 바인더의 비용과 공급에 복합적인 영향을 미쳤다. 이로 인해 원유 정제과정을 위한 새롭고 다양한 방식의 정제과정이 도입되었다. 이러한 원유 정제과정에서 대량의 황이 산업부산물로 발생하게 되었으며 이에 황은 가장 가능성 있는 아스팔트 바인더의 대체 물질로 출현하게 되었다.

Bencowitz and Boe(1938)는 황을 첨가한 아스팔트 바인더의 내구성 및 노화 특성은 주로 열과 산화작용에 의해 변화하는 것으로 추정되었으며, 이를 평가하기 위해 연화점 실험과 침입도 실험을 수행하였다. 그 결과, 유황 아스팔트 바인더가 기준 아스팔트 바인더보다 더 높은 연화점과 낮은 침입도 값을 나타냈다. 이는 기준 아스팔트 바인더보다 유황을 첨가한 아스팔트 바인더가 노화/경화가 더 크게 발생되며 강성이 증가하는 것으로 판단된다.

Lee(1975)는 황을 첨가한 개질 아스팔트 바인더의 노화 특성을 평가하기 위해 두 종류의 아스팔트 바인더에 황의 첨가비율을 달리하여 점도 실험과 침입도 실험을 수행하였다. 노화 특성을 모사하기 위해 thin film oven test(ASTM D 1754)를 사용하였으며, 실험 온도는 25~60℃에서 수행하였다. 그 결과, 유황이 첨가된 아스팔트 바인더가 기준 아스팔트 바인더보다 침입도 비 및 노화 지수가 증가하여 강성이 증가하는 것으로 판단되었다.

Kennedy et al(1977)는 SEA(Sulfur Extended Asphalt) 혼합물의 공학적 특성을 평가하기 위해서 정적 및 동적 간접인장실험을 수행하였다. 실험 변수로는 아스팔트 종류, 황의 첨가비율, 실험 온도 등을 이용하여 SEA 혼합물의 공학적 특성을 평가하였다. 결과적으로 기준 혼합물보다 SEA 혼합물의 실내 물성이 상대적으로 우수한 것으로 나타났으며 황의 첨가 비율이 50%일 때가 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 Meyer et al(1977)은 저온에서의 SEA 혼합물 강성이 아스팔트의 종류와 온도에 의한 영향이 가장 높았으나 황이 증가함에 따라 강성이 증가하는 경향을 나타냈다.



3. 실내실험

본 연구에서는 개질 첨가제인 SPC가 증가함에 따라 아스팔트 바인더 및 혼합물에 미치는 영향을 평가하기 위해 개질 첨가제 SPC를 첨가 비율별로 제조하여 아스팔트 바인더 및 혼합물 실험을 수행하였다. 첨가 비율은 0%, 10%, 30%, 50%로 하였으며 이에 따른 역학적 거동 특성과 공용성능에 대한 평가를 수행하였다.

SPC 개질 아스팔트 바인더의 강성 특성을 평가하기 위하여 SHRP(Strategic Highway Research Program)을 통해 미국에서 개발된 Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) 시스템의 바인더 실험법들을 이용하였다. SPC 개질 아스팔트 바인더의 노화에 대한 저항성을 평가하기 위하여 단기노화 및 장기노화 실험을 수행하였으며, 고온에서의 소성변형에 대한 저항성을 측정하기 위하여 DSR(Dynamic Shear Rheometer) 실험을 수행하였다. 또한 빙점 이하의 낮은 온도 조건하에서의 거동 특성을 평가하기 위하여 BBR(Bending Beam Rheometer) 실험을 수행하였으며, 이 두 실험을 토대로 SPC 개질 첨가제의 첨가 비율에 따른 아스팔트 바인더의 PG(Performance Grade:공용성 등급) 등급을 분류하고 온도에 따른 특성을 파악하였다.

SPC 개질 아스팔트 혼합물에 대한 물성 평가를 위하여 먼저 각각의 혼합물의 배합설계를 실시하였다. 여기에서 제작된 공시체에 대해 KS F 2337의 방법에 준하여 마찰 안정도 실험을 수행하였다. SPC 개질 아스팔트 혼합물에 대한 실내 공용 물성 실험으로는 소성변형에 대한 저항성을 평가하기 위하여 휠트래킹 실험(wheel-tracking test)을 수행하였으며, 각 혼합물의 피로균열 및 저온균열 특성을 평가하기 위하여 10℃ 및 -10℃에서 간접인장실험(Indirect Tensile Test : IDT)을 수행하였다. 그림 1은 개질 첨가제인 SPC의 역학적 거동 특성을 평가하기 위한 실내실험 과정을 나타낸다.

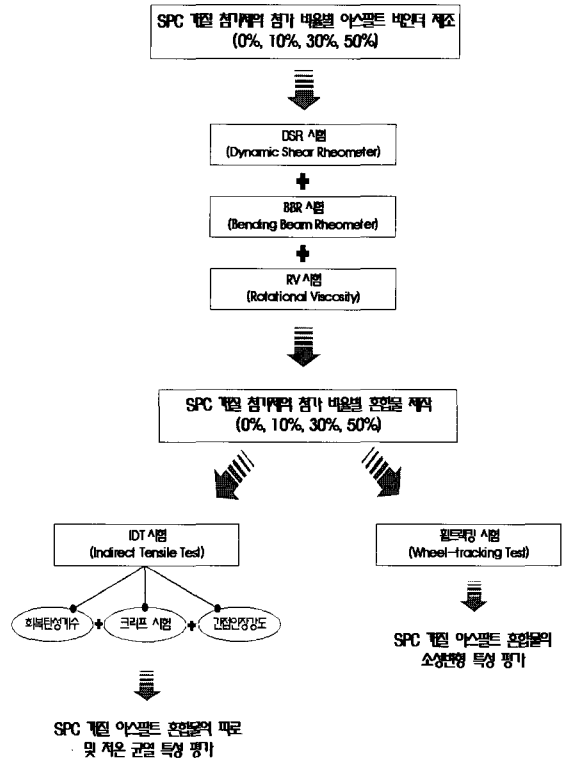


그림 1. SPC 개질 아스팔트 혼합물에 역학적 거동 특성 및 공용성능 평가를 위한 실내 실험 흐름도

3.1 실험재료

3.1.1 아스팔트 바인더 및 개질 첨가제

기준(control) 아스팔트 바인더로서 국내 S사에서 생산되는 일반 아스팔트 바인더(침입도 기준 60~80 등급 및 PG 등급 58-16)를 사용하였다. 표 1은 기준 아스팔트 바인더의 품질실험 결과를 나타낸다.

표 1. 기준 아스팔트 바인더 품질실험 결과

실험항목	실험규격	실험결과
침입도, 25℃/100g/5초	60~80	75
밀도, 15℃ g/cm³	1.0 이상	1.036
인화점, ℃	260 이상	348
연화점, ℃	44.0~52.0	46.8
신도, 15℃/5cm/분 ℃	100 이상	150



본 연구에서 사용된 SPC는 황을 주원료로 하였으며, 황의 취성적인 특성을 개선시키기 위해 카본 블랙 1%를 첨가하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 SPC는 고체형태로 제공되었으며, 이를 기준 아스팔트와 혼합하여 개질 아스팔트 바인더를 제조하였다.

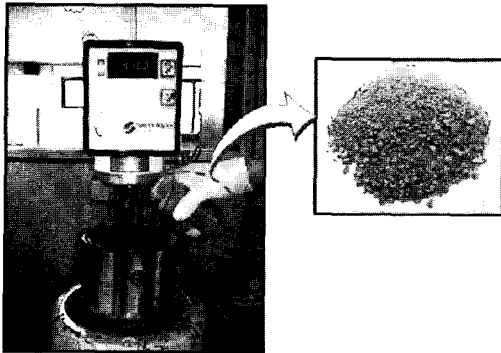


그림 2. SPC 혼합과정

3.1.2 골재

본 연구에 사용된 골재는 우리나라에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 화강암질 쇄석(국내 S사에서 생산)을 사용하였다. 골재의 품질시험 결과는 표 2 및 표 3과 같으며, 배합설계는 현재 아스팔트 포장에서 많이 사용하고 있는 19mm 밀입도로 실시하였다. 19mm 밀입도의 합성입도와 입도분포 곡선은 그림 3에 나타내었다.

표 2. 골재의 품질시험 결과

실험	구분	규격	시험 결과		
			굵은 골재	잔골재	채움재
비 중		2.5 이상	2.64	2.70	2.75
흡수율(%)		3.0 이하	0.75	0.66	-
마모율(%)		35 이하	22.92	-	-

표 3. 골재에 대한 입도별 편장석 시험 결과

골재종류	편장석 입자 백분율 (중량비)	기준
19mm	13.55%	20% 이하
13mm	19.74%	20% 이하
10mm	11.26%	20% 이하
5mm	1.32%	20% 이하

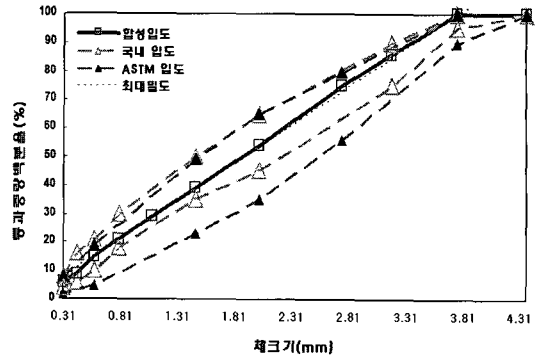


그림 3. 19mm 밀입도의 합성입도

3.2 아스팔트 바인더 실험

3.2.1 DSR(Dynamic Shear Rheometer) 실험

Superpave 시방 규정에 의하면 아스팔트의 단기 노화를 모사하기 위하여 RTFO(Rolling Thin Film Oven) 실험을 실시하여 시공단계에서의 아스팔트의 노화를 추정한다. 본 연구에서는 ASTM D 2872 규정에 따라 RTFO를 사용하여 163℃에서 85분간 단기 노화시키는 방법을 사용하였다. DSR 실험은 G^* (complex modulus)와 δ (phase angle)를 측정함으로써 아스팔트 바인더의 하중재하 시간과 온도에 따른 물성을 측정할 수 있다. Superpave 시방 규정에 의하면 노화전·후의 고온(60℃)에서의 소성 변형에 대한 저항성으로 $G^*/\sin\delta$ 가 1.0kPa과 2.2kPa 이상으로 규정하고 있다. 소성 변형은 고온에서 발생하므로 60℃에서의 $G^*/\sin\delta$ 값이 이 규정

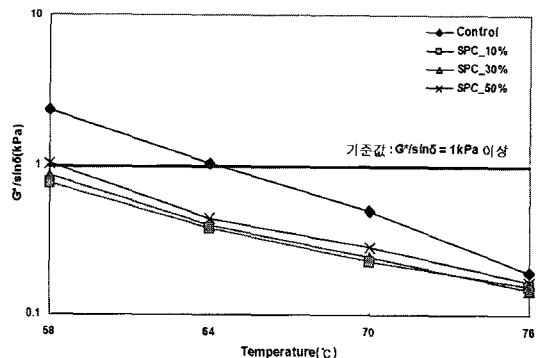


그림 4. DSR 실험 결과(노화전)

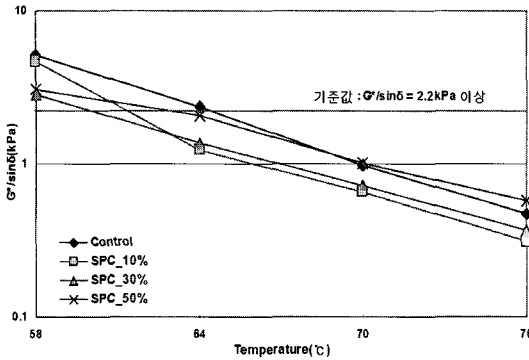


그림 5. DSR 실험 결과(노화후)

을 만족해야 한다. 그림 4에서와 같이 노화 이전의 아스팔트 바인더는 58°C에서 기준 바인더와 첨가비율 50%를 가지는 바인더만이 Superpave 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 그림 5에서와 같이 단기노화후 개질제를 첨가한 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 가 급격한 증가현상을 나타내어 노화 이전과 달리 58°C에서 Superpave 규정을 만족하는 것으로 나타났다. DSR 실험 결과, SPC 개질제는 고온에서의 성능 개선 효과가 없는 것으로 나타났다.

3.2.2 BBR(Bending Beam Rheometer) 실험

실제 공용중인 아스팔트 포장은 고온과 중간온도는 물론이고 빙점 이하의 낮은 온도 조건의 영향도 받는다. 이때의 아스팔트는 매우 단단하여 탄성체와 유사한 거동을 하게 된다. BBR 실험은 포장이 경험하게 될 가장 낮은 온도 조건하에서 빔의 형태로 제작된 아스팔트 시료에 creep 하중(정하중)을 240초 동안 가하며 처짐을 측정하고 creep 하중에 대한 저항능력인 크리프 강성(St)과 강성의 변화율(m-value)을 계산한다. 따라서 수퍼페이브 시방서는 크리프 강성 값이 300MPa 이하, m-value가 0.304 이상이 되도록 권고하고 있으며, 만일 그 이상인 경우에는 추가적인 direct tension test를 실시하여 파괴시 인장변형률이 1% 이상이 되는지를 확인할 필요가 있다. 그림 6은 BBR 실험 결과 m-value를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 기준 바인더만이 -12°C에서 Superpave

기준 값인 0.304를 만족하지 못하는 결과를 나타냈으며, 그림 7에서도 기준 바인더만이 Superpave 기준인 300kPa 이하를 만족하지 못하는 결과를 나타냈다. 이는 개질 첨가제인 SPC가 저온 균열에 대한 저항성을 증가시키는 것으로 판단된다.

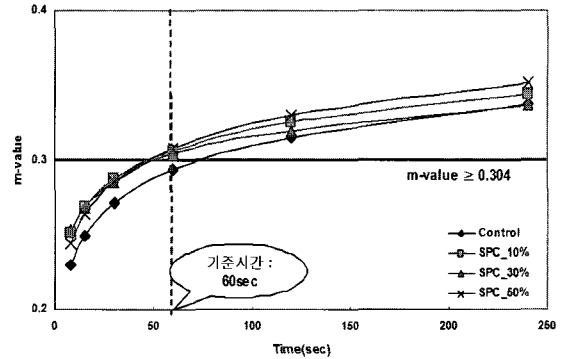


그림 6. BBR 실험 결과(m-value)

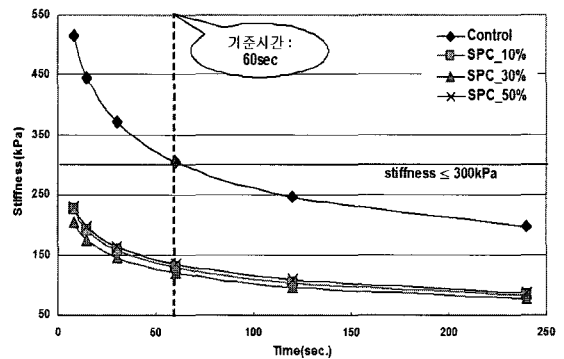


그림 7. BBR 실험 결과(stiffness)

3.2.3 RV(Rotational Viscosity) 실험

회전점도실험(RV)은 현장에서 아스팔트 바인더를 펌핑하고 혼합할 때 아스팔트의 점도를 모사하기 위하여 SHRP에서 채택한 실험법이다. 본 연구에서는 brookfield therosel 장비를 사용하였으며 ASTM D 4402에 준하여 실험을 수행하였다. 스피들은 No. 27을 사용하였으며, 회전속도 20rpm을 적용하였다. 측정된 점도 값은 3Pa·s(300centiPoise) 이하가 되어야 하며 플랜트에서 아스팔트 바인더의 작업성을 평가하기 위한 것이기 때문에 노화되지 않은 시료에 대해서만 측정한다. RV실험 결과, 표 4에서와 같



이 SPC 개질 바인더가 모두 135℃에서 기준 바인더에 비해 동점도가 현저히 낮음을 알 수 있었다. 표 4는 총 4종의 아스팔트 바인더에 대한 공용성 등급 실험 결과 및 PG 등급을 정리한 것이다.

표 4. 공용성 등급 실험 결과

공용성 등급 기준 물성		control	type 1	type 2	type 3
135℃ 동점도(cP), 5000cP 이하		385	320	275	240
G'/sinδ (kPa)	노화이전 1.0 kPa이상	1.02 (64)	0.75 (58)	0.86 (58)	1.02 (58)
	단기노화 2.2 kPa이상	2.33 (64)	4.68 (58)	2.81 (58)	3.06 (58)
BBR, S	장기노화 300 kPa이하	305 (-12)	129 (-12)	119 (-12)	134 (-12)
BBR m-value	장기노화 0.3이상	0.293 (-12)	0.306 (-12)	0.304 (-12)	0.307 (-12)
등급기준		64-16	58-22	58-22	58-22

3.3 배합설계

3.3.1 SPC 개질 아스팔트 바인더의 제조 방법

본 연구에서 사용된 개질 첨가제인 SPC는 황(Sulfur) 계열의 첨가제로서 아스팔트 바인더 비중의 약 1.8배 높은 비중 값을 가진다. 그러므로 배합설계를 수행할 경우, 아스팔트 바인더의 총 체적이 기존의 사용된 아스팔트(치환되기 전 아스팔트) 총 체적보다 줄어드는 결과를 가져온다. 즉, 중량 대비

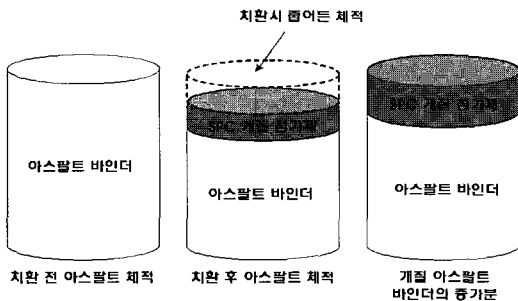


그림 8. 치환 후 증가된 아스팔트 바인더

표 5. 치환 시 증가된 총 아스팔트 바인더 량

치환 전 사용량 (%)	SPC 첨가제 중량 20% 치환 (%)	SPC 첨가제 중량 30% 치환 (%)	SPC 첨가제 중량 40% 치환 (%)	SPC 첨가제 중량 50% 치환 (%)
5	5.5	5.8	6.0	6.3
5.1	5.6	5.9	6.1	6.5
5.2	5.7	6.0	6.3	6.6
5.3	5.8	6.1	6.4	6.7
5.4	5.9	6.2	6.5	6.8
5.5	6.0	6.3	6.6	7.0
5.6	6.1	6.5	6.7	7.1
5.7	6.2	6.6	6.8	7.2
5.8	6.3	6.7	7.0	7.3
5.9	6.4	6.8	7.1	7.5
6	6.5	6.9	7.2	7.6

로 SPC 개질 첨가제를 치환할 경우 총 체적이 유지 되도록 아스팔트 바인더의 양을 증가시켜야 한다. 그림 8은 기준 아스팔트 바인더 양과 SPC 개질 아스팔트 바인더의 양을 비교한 것이다.

또한, 동일한 체적으로 유지하기 위해 증가되는 아스팔트 함량은 다음과 같은 방법으로 계산되어지며 표 5는 SPC 첨가 비율에 따른 아스팔트 바인더의 증가분을 나타낸 것이다.

$$W = \frac{10000 \times A \times B}{10000 \times B - (100 \times C \times (B-1) + A \times (B-1))}$$

여기서, W=치환된 총 아스팔트 바인더 량 (중량, %)

A=기존 아스팔트 함량 (치환되기 전 사용된 아스팔트 함량)

B=SPC 개질 첨가제의 비중/ 일반 아스팔트 바인더의 비중

C=SPC 개질 첨가제의 첨가 비율

3.3.2 최적아스팔트 함량 결정

아스팔트 혼합물의 배합설계는 아스팔트 함량별로 제조된 공시체의 물성실험과 마찰 안정도실험을 통하여 최적 아스팔트 함량(OAC:Optimum Asphalt Content)을 선정하는 것이다. 본 연구에서는 KS 규



정으로 최적 아스팔트 함량을 결정하였다. 공시체 제작은 KS F 2337의 마샬식 아스팔트 혼합물 제조 방법에 따라 제조하였다. 표 6은 첨가비율에 따른 최적 아스팔트 함량을 나타내고 있다.

표 6. 첨가비율에 따른 최적 아스팔트 함량

구분	control	SPC_10%	SPC_30%	SPC_50%
최적아스팔트함량 (OAC:%)	5.0	6.0	6.6	5.9

3.4 아스팔트 혼합물 실험

3.4.1 간접인장실험(Indirect Tensile Test)

본 연구에서는 SPC 첨가 비율별로 제작된 아스팔트 혼합물에 대해 간접인장실험(Indirect Tensile Test, 이하 IDT)을 실시하여 각 개질 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수(resilient modulus), 크리프 컴플라이언스(creep compliance), m-value, 인장강도(tensile strength), 파괴 변형률(fracture strain), 파괴 에너지(fracture energy) 및 파괴시 소산된 크리프 변형 에너지(DCSE)를 결정하였다. 실험 온도는 10℃ 및 -10℃에서 수행하였다.

3.4.2 소성변형 저항성 실험

아스팔트 포장 표면 위를 통행하는 차량으로 재하되는 포장체 내의 응력 상태는 매우 복잡하므로, 이를 아스팔트 혼합물의 시편에 대해 실내 실험으로 정확히 재현시키기는 거의 불가능하여, 외국의 경우에는 주로 다른 재료에 대한 거동의 상대적 비교를 위해 포장가속실험기(APT)를 통한 모사 실험을 사용하고 있다.

본 연구에서 사용한 휠트래킹 실험은 일본의 건설성에서 사용하고 있는 실험 절차를 적용하였으며, 실험 장비로는 크랭크 방식의 변속 구동형 실험기를 사용하였다. 이를 통해 포장의 표층과 동일한 형상으로 제작된 아스팔트 혼합물의 빔 표면을 소정의 접지압과 고무 경도를 가진 솔리드 타이어로 주행시켜 차량

침하량의 시간 변화를 측정하였다. 이러한 실험결과를 계산하여 아스팔트 혼합물의 소성 변형 저항을 평가할 수 있다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 간접인장실험 결과

4.1.1 회복탄성계수

SPC 개질 아스팔트 혼합물의 강성(stiffness) 특성을 측정하기 위하여 10℃와 -10℃에서 회복탄성계수를 측정하였다. 그림 9와 같이 10℃에서는 SPC의 첨가비율에 따른 강성 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 -10℃에서는 첨가 비율에 따른 강성 변화가 발생되는 것으로 나타났으나 그 경향이 일정하지 않은 것을 알 수 있다. 그리고 10℃와 -10℃에서의 SPC 개질 아스팔트 혼합물이 기준 혼합물보다 강성이 작은 것으로 나타났다. 그러나 온도에 따른 강성 변화의 폭이 기준 혼합물보다 현저히 감소되는 경향을 나타내어 그림에서와 같이 회복탄성계수가 낮음에도 불구하고 온도 균열에 대한 저항성이 증가할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

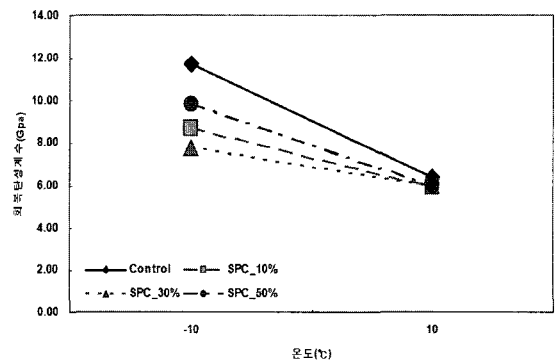


그림 9. 회복탄성계수 실험결과

4.1.2 크리프 실험결과

SPC의 첨가 비율에 따른 아스팔트 혼합물의 소성 변형 저항성 및 저온 균열 저항성을 평가하기 위해



10℃와 -10℃에서 고정 하중 1000초 일 때의 크리프 실험을 수행하였다. 그림 10은 m-value와 크리프 컴플라이언스(creep compliance)를 나타낸다. 크리프 컴플라이언스는 정하중 상태에서의 변형량을 의미하며, m-value 값은 아스팔트 혼합물의 손상 누적 속도와 깊은 관계를 가지며 m-value 값이 작을수록 누적 손실율도 작은 것을 의미한다(Kim, 2003). 10℃에서의 크리프 컴플라이언스는 첨가비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, m-value 또한 감소되는 경향을 나타냈다. 반면, -10℃에서의 크리프 컴플라이언스와 m-value는 10% 첨가비율을 가지는 혼합물을 제외하고 10℃와 유사한 결과를 나타내었다. 즉 SPC 혼합 비율이 증가할수록 정하중 상태에서 변형이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 -10℃에서 10%의 첨가비율을 가지는 혼합물이 더 큰 크리프 컴플라이언스와 m-value를 보여주었다. 따라서 개질 첨가제인 SPC의 혼입되는 양에 따라 개질의 효과가 크게 좌우되는 것으로 알 수 있으며, 일정한 양 이상이 첨가되어야 개질의 효과를 충분히 발휘하는 것으로 판단된다.

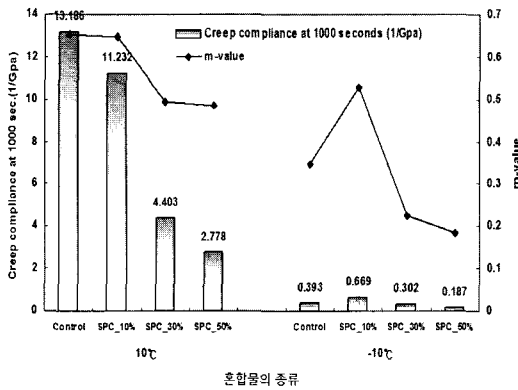


그림 10. 크리프 실험결과

4.1.3 간접인장강도 실험

SPC 개질 아스팔트 혼합물의 균열에 대한 저항성을 평가하기 위해 10℃와 -10℃에서 간접인장강도 실험을 수행하였다. 그림 11에서와 같이 10℃에서 간접인장강도는 첨가비율 10%에 해당하는 혼합물을 제외하고 기준 혼합물보다 높은 인장강도를 나타

냈으며 30%와 50%는 거의 유사한 인장강도를 가지는 것으로 나타났다. 파괴변형률(failure strain)은 첨가비율이 증가할수록 감소되는 경향을 나타내었는데 이는 SPC의 양이 증가할수록 취성적인 특성을 가지게 되는 것으로 사료된다. 또한 첨가비율 10%와 30% 사이에서 파괴변형률이 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있는데 이는 개질 첨가제가 일정량 이상이 되면 혼합물의 취성적인 특성이 발현된다는 것을 의미한다. 반면, -10℃에서는 10℃와는 달리 첨가비율 50% 혼합물이 가장 작은 인장강도를 가지는 것으로 나타났으며 첨가비율이 증가할수록 인장강도가 감소되는 경향을 나타냈다. 이러한 특성은 그림 10에서도 확인할 수 있다. 즉 SPC 첨가비율 10%와 30% 사이에서 급격한 크리프 컴플라이언스 감소를 보이며 이러한 특성이 파괴변형률의 급격한 하락을 보여준 것으로 판단된다.

온도 변화에 따른 파괴 변형률을 살펴보면 기준 혼합물과 10% 해당하는 혼합물은 온도가 10℃에서 -10℃로 떨어짐에 따라 50%이하로 파괴변형률이 감소한 것에 비해 SPC 30%와 50% 혼합물은 약 20% 정도의 감소 현상을 볼 수 있다. 이는 개질 첨가제인 SPC의 양이 증가할수록 온도에 따른 혼합물의 취성적인 특성 변화가 줄어들기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 결과는 SPC가 저온 균열에 대한 저항성을 향상시킬 수 있음을 의미한다. 그림 11의 결과로부터 파괴에너지를 구하면 그림 12와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서와 같이 10℃에서는 SPC 개질 첨가제가 증가할수록 파괴에너지가 감소되는 경향을

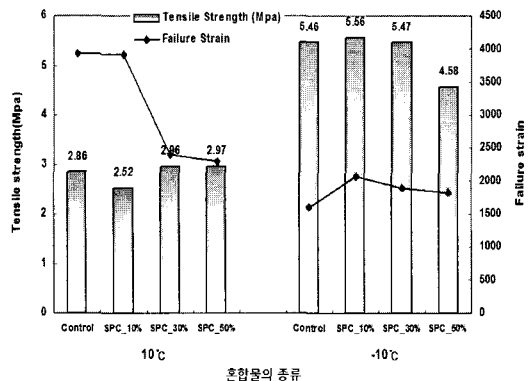


그림 11. 간접인장강도 실험결과



나타냈다. 또한 -10℃에서는 SPC 10%를 제외하고 거의 유사한 파괴에너지를 보여주었다. 그러나 적정량(30% 이상)의 SPC는 온도 변화에 따른 특성변화가 작아 온도 균열에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

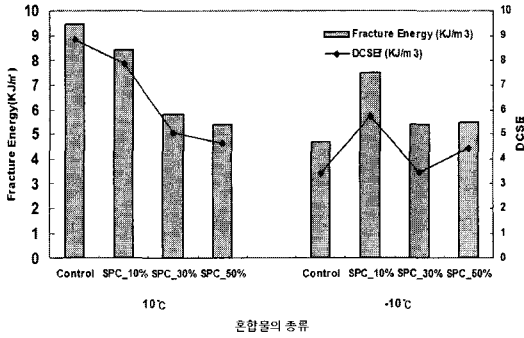


그림 12. 간접인장강도 실험결과

4.2 소성변형 저항성 실험 결과

본 연구에서는 소성변형 저항성을 평가하기 위한 실험방법으로 휠트랙킹 실험을 수행하였다. 휠트랙킹 실험을 통해 측정되는 물성에는 침하깊이(Depth of rut:DR)와 동적 안정도(Dynamic stability : DS)가 있으며, 이 중에서 동적 안정도는 실험결과 값이 클수록 소성 변형에 대한 저항성이 큰 것으로 알려져 있다. 그림 13과 그림 14는 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 동적 안정도와 침하깊이 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 13과 같이 SPC 개질 첨가제의 첨가비율 30%와 50%에서 동적 안정도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. SPC 첨가비율이 30%인 개질 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물에 비해 약 2배 높은 동적 안정도를 가지며, 50%인 경우는 약 14배 정도 높은 동적 안정도를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 SPC 10%에서의 변형량은 오히려 기준 혼합물보다 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 그림 12의 간접인장실험에서도 확인한 결과로 적절한 SPC 함유량 선정의 중요성을 보여주는 결과라 하겠다.

그림 14에서는 SPC 개질 첨가제의 첨가비율에 따른 처짐량의 차이가 뚜렷하게 나타나고 있다. SPC 개질 첨가제의 첨가비율 10%는 초기 처짐이 급격하

게 발생하여 10000회까지 실험을 완료하지 못하고 약 3600회에서 최대 처짐량(20mm)을 초과하였다. 그러나 SPC 개질 첨가제의 첨가비율이 30%와 50%인 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물에 비해 각각 4배, 6배 정도 낮은 처짐량을 나타냈다.

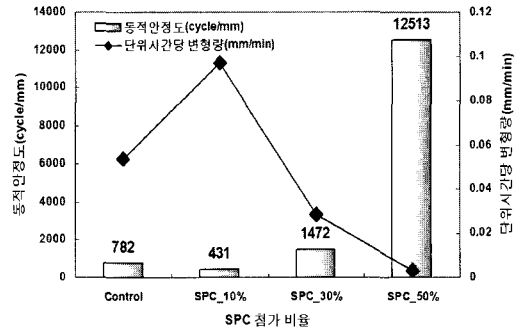


그림 13. SPC 첨가비율에 따른 동적 안정도 실험결과(60℃)

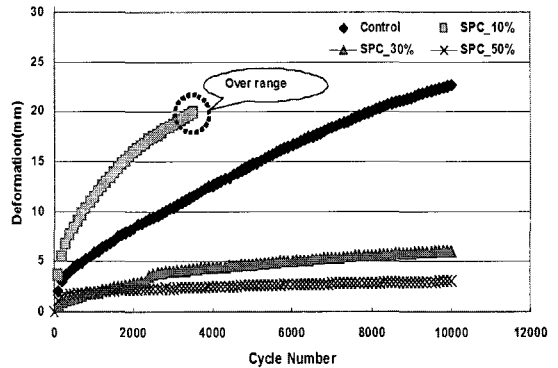


그림 14. SPC 첨가비율에 따른 처짐량 실험결과

5. 결론

- 고온에서의 바인더 실험결과, SPC를 첨가한 바인더가 기준 아스팔트 바인더보다 고온에서의 $G^*/\sin\delta$ 값이 감소되는 경향을 나타냈으며 개질제의 첨가비율이 증가하더라도 동일한 결과를 나타내었다. 따라서 개질 첨가제인 SPC는 고온에서 바인더의 성능 개선효과가 없는 것으로 판단된다.
- 저온에서의 바인더 성능실험결과, -12℃에서 SPC 개질 바인더는 Superpave 기준을 만족하였다. 따



라서 SPC는 저온에서 바인더의 성능을 개선시키는 것으로 판단된다.

- 아스팔트 혼합물의 강성(stiffness)을 측정하기 위한 실험결과, 10℃와 -10℃ 두 온도에서 모두 기준 혼합물보다 낮은 강성 값을 갖는 결과를 나타냈다. 그러나 기준 혼합물보다 온도에 따른 강성 변화의 폭이 현저히 감소되는 경향을 나타내어 강성이 낮음에도 불구하고 온도 균열에 대한 저항성이 증가될 것으로 판단된다.
- SPC 개질 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 평가하기 위한 실험결과, 간접인장실험에서는 개질제의 첨가비율이 증가할수록 10℃와 -10℃ 모두 누적 손상속도가 감소되고 크리프 컴플라이언스가 감소되는 것으로 나타났다. 또한 휠트랙킹 실험에서도 동적 안정도가 증가하고 처짐량이 감소되어 간접인장실험과 동일한 결과를 나타내었다. 따라서 개질 첨가제인 SPC의 양이 증가할수록 소성변형 저항성이 증가하는 것으로 판단된다.
- SPC 개질 아스팔트 혼합물의 균열 저항성을 평가하기 위한 실험결과, SPC 개질 첨가제의 첨가비율이 증가할수록 10℃와 -10℃ 모두 파괴변형률이 감소하는 것으로 나타나 혼합물의 취성 특성이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 온도 변화에 따른 파괴변형률은 첨가비율이 증가할수록 변화 폭이 감소되어 10℃와 -10℃에서 거의 유사한 거동을 하는 것으로 판단되며, 이는 SPC가 저온에서의 균열 저항성을 증가시킬 수 있는 잠재성을 보여주는 실험결과이다.
- 실험결과, 모든 실험에서 개질 첨가제인 SPC는 어느 일정량 이상이 첨가되면 혼합물의 물성이 변화되는 것을 알 수 있었는데 첨가비율 10%와 30% 사이에서 급격한 변화가 나타났다. 따라서 개질 첨가제인 SPC의 성능 개선효과를 발휘시키기 위해서는 일정량 이상을 혼입해야 하는 것으로 판단된다.
- 고온에서의 아스팔트 바인더 특성인 $G^*/\sin\delta$ 값과 혼합물 특성인 휠트랙킹 실험값이 일관되지 않은 결과를 보여주고 있다. 이러한 개질 첨가제에 대한 아스팔트 바인더 물성과 혼합물 물성의 불일치는

Deme(2004) 등에 의해 보고된 바 있다. 따라서 황과 같은 개질제가 첨가된 바인더의 경우는 고온에서의 DSR과 같은 실험이 혼합물의 공용성을 표현하는데 부적절할 수도 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 아스팔트포장연구회 역(1999), "아스팔트 포장공학 원론", 한국도로포장공학회.
2. AASHTO(1994), "Standard Test Method for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt(HMA) Using the Indirect Tensile Test Device", AASHTO Designation : TP9-96.
3. Buttlar W. and R. Roque(1994), "Development and Evaluation of the SHRP Measurement and Analysis System for Indirect Tensile Testing at Low Temperatures" Presented at the 1994 Transportation Research Board Meeting.
4. D. Y. Lee(1975), "Modification of Asphalt and Asphalt Paving Mixtures by sulfur Additives," *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev., Vol. 11, No. 3.*
5. Isaac Bencowitz and E. S. Boe(1938), "Effect of Sulfur Upon Some of the Properties of Asphalts," *Proceedings of the American Society for Testing and materials, Vol. 38, Pt. II.*
6. T. W. Kennedy, et al(1977), "Engineering Evaluation of Sulphur-Asphalt Mixtures," *Transportation Research Board Research Record* 659.
7. R. P. Meyer, et al(1977), "Temperature Susceptibility Evaluation of Sulphur-Asphalt Mixtures," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, 452-480.*
8. Booil Kim(2003), "Evaluation of the Effect of SBS Polymer Modifier on Cracking Resistance of Superpave Mixtures," Ph.D. Dissertation, University of Florida.
9. Deme I. and B. Kennedy(2004), "Use of Sulfur in Asphalt Pavement" Presented in 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics.

접 수 일: 2006. 7. 24
 심 사 일: 2006. 8. 2
 심사완료일: 2006. 9. 5