

CR/SBS 개질 아스팔트 실란트의 저온접착특성에서 파라핀 오일 첨가에 의한 효과

김두병** · 이대우* · 김종석†,*

*전북대학교 화학공학부
561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14
**로드 씰(주)
565-851 전북 완주군 의성리 414-2
(2011년 4월 30일 접수, 2011년 7월 26일 채택)

Effect of Paraffin Oil on the Low Temperature Adhesion Properties of CR/SBS Modified Asphalt Sealants

Doo Byung Kim**, Dae Woo Lee* and Jong-Seok Kim†,*

*School of Chemical Engineering, Chonbuk National University,
664-14, 1 ga, Duckjin-dong, Duckjin-gu, Jeonju-si, Jeonbuk 561-756, Korea
**Road Seal Co., Ltd. 414-2 Esung-ri, Wanju, Jeonbuk 565-851, Korea
(Received 30 April 2011; accepted 26 July 2011)

요 약

본 연구의 목적은 styrene-butadiene-styrene(SBS) 블록공중합체와 페타이어 고무분말(crumb rubber, CR)로 개질한 아스팔트의 저온접착특성에 대해 파라핀오일 가소제의 영향에 대한 것이다. SBS/CR로 개질한 아스팔트 블렌드와 파라핀오일/SBS/CR 아스팔트 블렌드의 온도 민감성을 침입도와 연화점으로 측정하였다. 형광현미경으로 파라핀오일/SBS/CR 아스팔트 블렌드에 대한 개질제들의 분산 상태와 만능시험기로 저온에서 접착성질을 각각 측정하였다. 저온 접착시험에서 SBS 함량의 증가와 파라핀오일 함량 5 wt % 및 10 wt %에서 접착강도와 변형률이 증가하였다. -20 °C에서 측정된 접착강도와 강인성은 파라핀오일이 10 wt %와 SBS 공중합체의 양이 6 wt %인 조성에서 최대값을 얻었다. SBS/CR/아스팔트 블렌드에서 파라핀오일의 첨가는 유연성을 부여하는 효과를 나타내고, 저온에서 강인성의 증가를 가져오는 것을 확인하였다.

Abstract – The main objective of this work was studying the influence of paraffin oil(PO) on the adhesion properties at low temperature in styrene-butadiene-styrene(SBS) copolymer and crumb rubber(CR) modified asphalt. The temperature susceptibility of SBS/CR asphalt and PO/SBS/CR/asphalt blends were measured by penetration and softening point. Adhesion properties at low temperature and dispersion of modifiers in PO/SBS/CR/asphalt blends were evaluated by universal test machine and florescence microscopy, respectively. The adhesion properties of PO/SBS/CR/asphalt blends at low temperature increased in the proportion of SBS contents with both 5 and 10 wt % of paraffin oil. Results showed that the maximum tensile adhesion strength and toughness energy at -20 °C were obtained when PO and SBS contents were 10 wt % and 6 wt %, respectively. The addition of PO is effective for enhancing the flexibility of SBS/CR/asphalt blends and leads to the increase of toughness at low temperature.

Key words: Modifier, Paraffin Oil, Asphalt, Plastic Deformation, Low Temperature Adhesion

1. 서 론

전 세계에서 매년 도로에 사용되고 있는 아스팔트 바인더의 양은 9,000 만 톤에 이르고 있다. 선진국에서는 도로의 기반 구조와 경제 발전과의 연관성을 도로 기반구조에 소비된 아스팔트의 양으로 나타내고 있다. 아스팔트 실란트를 이용하여 도로의 유지와 보수는 국가

의 경제발전에 중요한 관심이 되고 있다. 따라서 아스팔트 실란트의 물성향상에 대한 연구와 이를 이용한 도로의 유지보수를 위한 기술의 발전이 현재 활발하게 진행 중에 있다[1,2]. 아스팔트 바인더는 0 °C 이하인 저온영역에서는 취성구조에 따라 균열이 발생한다[3]. 도로 유지보수제로 사용되고 있는 고분자 개질 아스팔트 실란트(polymer modified asphalt sealants, PMAS)는 저온유연성과 고온변형력을 향상시킨 것이다[4-6]. 도로의 보수 및 유지용으로 사용되고 있는 아스팔트 실란트로는 페타이어 고무분말(crumb rubber, CR)을 첨가한 PMAS와 더불어 스티렌-부타디엔-스티렌 블록공중합체(SBS

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: js-kim@jbnu.ac.kr

*이 논문은 전북대학교 김기주 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

triblock copolymer) 개질 아스팔트 실란트가 사용되고 있다[6-8]. SBS 블록공중합체의 구조는 탄성체의 양 말단에 스티렌 블록으로 이루어져 있으며 부타디엔 도메인(domain)은 탄성영역을 강화하는 충전제의 역할과 함께 3차원 망상구조를 형성하는 물리적 가교제로서의 역할을 한다. SBS블록공중합체는 soft segment 구조의 polybutadiene 양쪽에 hard segment 구조의 polystyrene 블록이 결합되어 있는 삼중블록구조를 가지고 있다. SBS 블록공중합체의 모폴로지는 polybutadiene 매트릭스에 polystyrene 도메인이 형성되어 있음을 보여준다. 따라서, polystyrene과 polybutadiene이 화학적으로 구분되는 블록구조를 가지고 있으나 거시적으로는 폴리스티렌블록과 폴리부타디엔 블록이 상분리가 되어 있음을 알 수 있다[9]. SBS 블록공중합체는 고무탄성 성질과 열가소성의 성질을 함께 가지고 있어 기존의 도로포장용 혼합물 및 도로의 취성 파괴를 방지하는 아스팔트 실란트로 사용되고 있다[10,11].

본 연구에서 -20 °C인 저온영역에서 SBS/CR로 개질된 아스팔트는 기존 아스팔트 바인더가 갖는 취성구조와 탄성 회복율이 크게 개선되었으나, 고분자와 아스팔트 바인더간의 상 분리에 따라 접착강인성이 개선되지 않는 결과를 보였다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 저온에서 PMAS의 접착강도와 강인성을 향상시키기 위한 개질제로 파라핀오일을 사용하였다. 파라핀오일 함량의 변화에 따라 CRMAS의 침입도와 침입도지수를 측정하였고 -20 °C에서 인장접착강도와 강인성 등의 실험을 수행하여 그 결과를 나타내었다.

2. 실험

2-1. 재료

아스팔트 바인더는 SK 주식회사의 침입도 등급이 80인 AP-5 스테이트 아스팔트를 사용하였다. 아스팔트 바인더의 개질제는 CR과 SBS 블록 공중합체를 사용하였다. 페타이어 고무분말(CR)의 입자크기가 30 mesh인 것을 자원재생공사에서 구입하였다. SBS는 (주) 금호석유화학의 KTR-101을 사용하였고, 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 아스팔트 바인더와 SBS의 가소제 및 유연제로 작용하는 파라핀 오일은 미창석유공업주식회사의 4060을 사용하였으며, 파라핀오일의 유동점은 -45 °C이고, 40 °C에서 동점도는 8.0 cSt인 특성을 보였다.

2-2. CR 개질 아스팔트와 SBS/CR/아스팔트 블렌드의 제조

CR 표면에 존재하는 수분을 완전히 제거하기 위해 80 °C에서 1 torr의 진공도로 유지된 진공건조기에서 24시간 진공건조하였다. CR 개질 아스팔트의 혼합반응조건은 아스팔트 바인더와 개질제의 총량을 300 g으로 일정하게 하고 아스팔트가 완전 용융되었을 때 CR 10 wt %를 소량씩 나누어 첨가하여 혼합반응시켰다. 혼합반응조건은 600 rpm의 교반속도로 180 °C의 온도에서 반응시간을 1시간으로 하였다. SBS/CR/아스팔트 블렌드는 CR은 10 wt %로 고정하고 파라핀오일은 5 wt %와 10 wt %로 각각 첨가한 후 SBS의 양을 3~6 wt %

Table 1. Mechanical Properties of SBS

Styrene Content, %	30
Tensile Strength, MPa	25
Modulus, 300%, MPa	2.2
Elongation, %	750
Hardness, Shore A	72

Table 2. Composition of Paraffin Oil modified SBS/CR/Asphalt Blends

Modifier Number	Asphalt	SBS	CR	Paraffin Oil
wt %				
1	90	0	10	0
2	85	0	10	5
3	87	3	10	0
4	82	3	10	5
5	77	3	10	10
6	86	4	10	0
7	81	4	10	5
8	85	5	10	0
9	80	5	10	5
10	84	6	10	0
11	79	6	10	5
12	74	6	10	10

에서 혼합반응시켰다. 개질제로 사용한 파라핀 오일과 CR 및 SBS의 조성은 Table 2에 나타내었다. 이들 반응조건은 냉각관을 설치한 반응기에서 질소로 치환하면서 교반속도를 600 rpm로 하여 180 °C에서 3시간 혼합하였다.

2-3. 침입도 및 연화점 측정

침입도 시험은 침입도 시험방법인 ASTM D5에 따라 각 시료를 직경 5 cm, 깊이 5 cm의 알루미늄 캔에 넣은 다음 상온에서 12시간 이상 냉각한 후 각각 3 °C와 10 °C 및 25 °C로 온도가 다르게 유지된 항온조에서 2시간 이상 정치시킨 다음 침입도 시험을 하였다. 하중 100 g에서 5초간 바늘이 들어간 깊이를 0.1 mm 단위로 나타내었다. 침입도 측정 시 침입도 측정하는 점이 시료 용기 주변에서 10 mm 이상 떨어진 점에서 7회 측정하여 최대 침입도 값과 최소 침입도 값을 제외한 5개의 침입도 측정치의 평균을 계산하였다[12]. CR과 SBS 개질 아스팔트의 온도 민감성을 평가하기 위해 각 시험온도에서 얻은 침입도를 통해 침입도 지수(penetration index, PI)를 실험식으로부터 계산하였다[13]. 각 온도에서 측정하여 얻은 침입도 대 측정온도차의 반 로그 좌표로부터 직선관계를 얻었다. 좌표에 나타난 직선의 기울기 A는 식 (1)로부터 구하였다.

$$A = [(\log \text{Penetration at } T_1 - \log \text{Penetration at } T_2) / (T_1 - T_2)] \quad (1)$$

식 (1)에서 얻은 A를 식 (2)에 대입하여 침입도 지수를 구하였다.

$$PI = [(20 - 500A) / (1 + 50A)] \quad (2)$$

연화점의 측정은 연화점 측정방법인 ASTM D36에 따라 3회 이상 반복하여 연화점을 측정하였다[14].

2-4. 저온 인장접착력의 측정

저온에서 CR 및 SBS로 개질한 아스팔트의 인장접착력은 ASTM D5329에 따라 측정하였다. 시험을 위해 화강암블록(13 mm × 25 mm × 50 mm)을 먼저 제작하였다. 화강암 블록은 시험 전 표면의 불순물을 제거하기 위해 아세톤과 에탄올로 세척 후 상온에서 2시간 건조하여 사용하였다. 화강암블록 양쪽 끝에 12.5 mm × 12.5 mm × 25 mm크기의 화강암 블록지지대를 설치한 후 빈 공간에 개질아스팔트를 채운 뒤 3에서 냉각하여 시편을 제작하였다. 시험시편을 -20 °C에서 2시간 이상 정치시킨 다음 -20 °C에서 만능시험기를 이용

하여 crosshead speed는 12.5 mm/min로 5회 이상 반복하여 인장접착강도와 변형률을 측정하였다[15]. 인장접착력에서 변형률에 대한 인장접착강도 곡선의 면적으로 접착강인성을 구하였다.

2-5. 형광현미경 분석

Zeiss사의 Axioskop 2로 SBS/CR 개질아스팔트에 대한 형광현미경 분석을 하였으며, 램프는 450 nm 파장에서 빛을 내도록 필터를 사용하여 분석하였다. 반응 후 채취한 용융된 개질 아스팔트를 180 °C로 유지된 slide glass위에 5 mg 떨어뜨린 뒤 cover glass를 덮어 반투명한 필름을 만든 다음 -20 °C으로 냉각하여 시료로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

아스팔트 바인더와 CR 및 SBS와 파라핀 오일을 첨가한 고분자 개질 아스팔트 블렌드의 조성과 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. 파라핀 오일과 고분자 개질제인 CR과 SBS가 아스팔트 바인더에 미치는 영향을 확인하기 위해 연화점과 침입도 및 침입도지수를 확인하였다. Table 3은 CR의 함량을 10 wt %와 파라핀 오일의 함량을 5 wt %로 일정하게 하여 SBS의 함량의 변화에 따른 CR/SBS 개질 아스팔트의 침입도와 침입도 지수 및 연화점의 변화결과로서, SBS의 함량이 3 wt %에서 6 wt %로 증가함에 따라 침입도는 77에서 45까지 감소하였다. 고분자 개질 아스팔트의 침입도는 고분자 개질제의 물리적 특성과 함량에 따라 변화한다. SBS의 함량이 6 wt %에서 SBS/CR 개질 아스팔트는 CR 개질 아스팔트에 비해 침입도는 17 감소하는 반면 연화점은 27 °C 증가하였다. 파라핀 오일을 첨가함에 따라 SBS/CR 개질 아스팔트의 침입도는 증가하였으나 연화점은 감소하였다[6]. 파라핀 오일이 CR과 SBS의 폴리부타디엔 사슬을 팽윤시켜 SBS/CR 개질 아스팔트의 유연성을 증가시킴을 알 수 있다. 침입도 지수(penetration index, PI)는 개질 아스팔트의 온도 민감성을 나타내는 물리적 특성의 척도로 사용되고 있다. AP-5 아스팔트 바인더는 실험식을 통하여 구한 침입도지수가 -1에서 1 사이의 범위를 나타내는 것으로 알려져 있다. 침입도 지수가 증가할수록 아스팔트 바인더와 고분자 개질 아스팔트의 온도에 대한 민감성이 감소하였다[16]. 아스팔트 바인더의 침입도 지수가 -0.81에서 CR의 함량이 10 wt %인 개질 아스팔트는 1.08을 나타내었으며 파라핀 오일의 첨가에 의해서 1.68로 증가하였다. SBS 함량이 증가함에 따라 SBS/CR 개질 아스팔트 블렌드의 침입도 지수가 증가하였다. 파라핀 오일의 첨가에 의해 아스팔트 바인더 내의 수지성분과 개질제의 사슬에서 분자 간 확산이 일어나며, 저온에서 고무탄성영역이 증가하

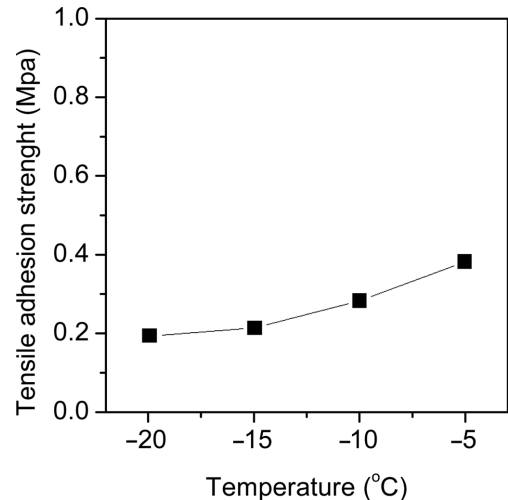


Fig. 1. Tensile adhesion strength for asphalt binders at low temperatures.

여 아스팔트 바인더와 고무성분의 유연성이 증가한 것으로 판단되었다[17]. 이러한 결과로부터 파라핀 오일을 첨가한 고분자 개질 아스팔트는 온도에 대한 민감성을 감소시키는 것을 알 수 있다.

시험온도변화에 따라 아스팔트 바인더의 인장접착강도를 Fig. 1에 나타내었다. 아스팔트 바인더는 저온영역에서 접착시험온도가 감소함에 따라 응력에 따라 변형률이 감소하였으며, 변형 없이 피착제인 화강암 계면에서 파괴되는 거동을 나타내었다. 아스팔트 바인더의 수지성분인 말텐(malten)의 유리전이온도(T_g)가 5 °C에서 나타나며, 말텐의 유리전이 온도 이하에서는 접착시험온도가 감소함에 따라 아스팔트 바인더가 소성변형하지 않고 취성파괴가 일어나는 응집력(cohesive strength)에 의해 접착강도가 감소하였다. Fig. 2는 CR의 함량을 10 wt%와 파라핀 오일의 함량을 5 wt%로 일정하게 하여 SBS의 함량의 변화에 따른 CR/SBS 개질 아스팔트 블렌드에 대한 형광현미경 분석을 나타내고 있으며, 검은 부분은 아스팔트 바인더와 CR이고, 밝은 부분은 SBS 영역이다. 분석결과 SBS 3 wt%를 갖는 개질 아스팔트는 아스팔트 바인더 안에서 불균일하게 상 분리된 불연속상으로 존재하였으나, 파라핀오일을 첨가한 경우는 불연속상의 SBS 도메인이 작고 균일한 상태를 나타내었다. 이러한 결과는 파라핀 오일이 SBS 블록구조에서 폴리스티렌 블록에 용매로 작용하고, 폴리부타디엔 블록에는 가소제로 작용하여 폴리부타디엔 블록의 길이를 증가시킨 결과로 판단되었다[18]. 따라서 파라핀 오일을 첨가함으로써 아스팔트 바인더에서 SBS의 분산성이 증가하여 아스팔트 바인더와 CR과의 상용성이 증가함을 알 수 있다. CR/SBS 개질 아스팔트에서 아스팔트 바인더 안에 존재하는 오일성분에 의해 CR이 팽윤되었을 알 수 있었다. SBS의 함량이 6 wt %에서 개질 아스팔트는 아스팔트 바인더 안에서 SBS가 연속 상으로 존재하며 파라핀 오일과 CR을 첨가한 경우에는 더 균일한 연속 상으로 존재하며 SBS 연속상이 증가함을 알 수 있었다.

아스팔트 바인더 안에서 SBS가 분산상으로 존재하는 3 wt %와 SBS가 연속 상으로 존재하는 6 wt %를 비교하기 위해 저온접착강도의 변화를 관찰하고자 했다. SBS의 함량변화에 따른 SBS 개질 아스팔트의 저온인장접착강도의 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. -20 °C에서 시험한 아스팔트 바인더는 0.19 MPa의 접착강도를 보였으나 SBS의 함량이 6 wt %에서는 0.46 MPa로 증가하였다. 파라핀

Table 3. Penetration and Softening Point of Paraffin Oil modified SBS/CR/Asphalt Blends

Composition (wt %)		Paraffin oil (wt %)	Penetration (0.1 mm)	Softening point (°C)	PI
SBS	CR				
0	0	0	77	51	-0.81
0	10	0	62	63	1.08
0	10	5	175	53	1.68
3	10	0	63	74	2.75
3	10	5	170	68	2.24
4	10	0	56	76	2.50
4	10	5	135	72	2.79
6	10	0	45	90	3.64
6	10	5	96	84	3.33

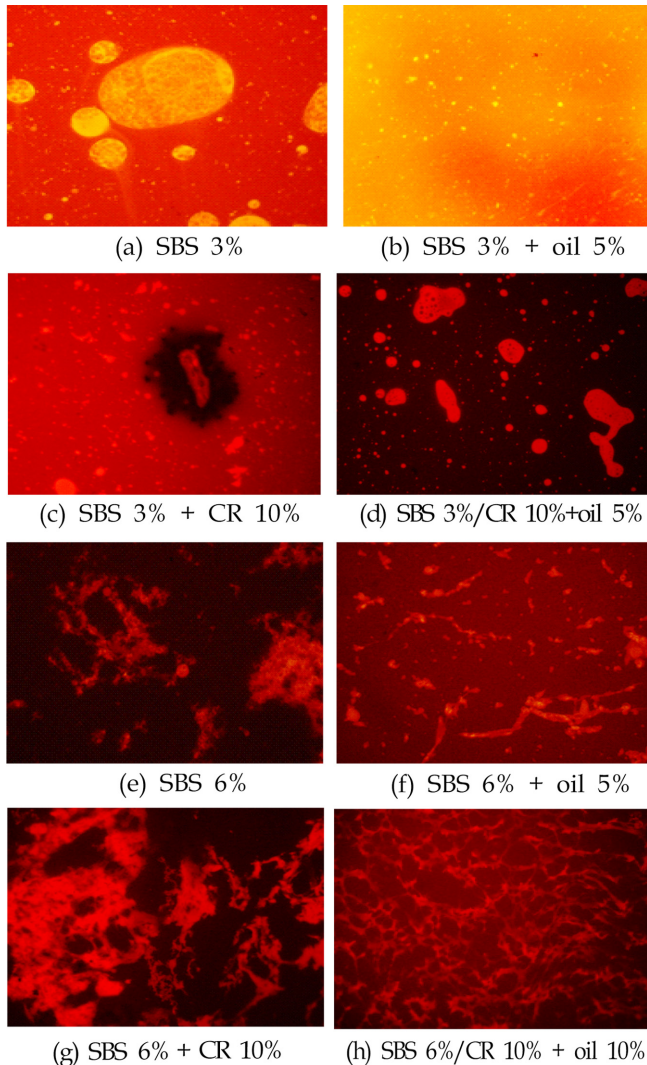


Fig. 2. Fluorescence microphotographs for SBS/CR/Asphalt blends with different paraffin oil and SBS contents (wt %): (a) SBS 3 wt %, (b) SBS/oil = 3/5, (c) SBS/CR = 3/10, (d) SBS/CR/oil = 3/5/10, (e) SBS 6 wt %, (f) SBS/oil = 6/5, (g) SBS/CR = 6/10, (h) SBS/CR/oil = 6/10/10.

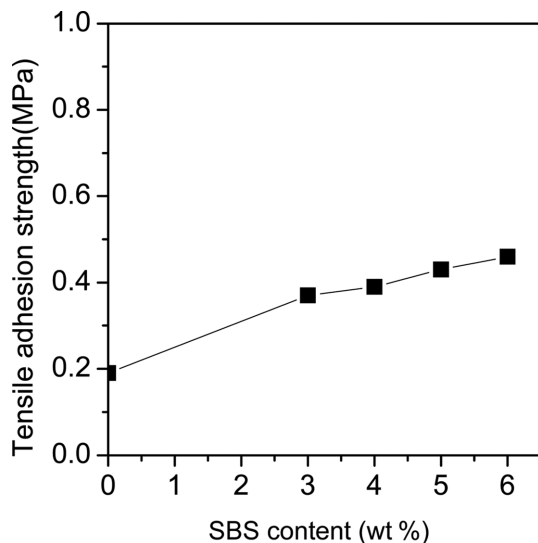


Fig. 3. Tensile adhesion strength for SBS modified asphalt at -20°C .

Table 4. Tensile Adhesion Properties of Paraffin Oil modified SBS/CR/Asphalt Blends at -20°C

Composition (wt %)		Paraffin oil (wt %)	Tensile adhesion strength (MPa)	Toughness energy (N·m)
SBS	CR			
0	0	0	0.19	1.6×10^{-2}
0	10	0	0.28	1.9×10^{-2}
0	10	5	0.43	4.5×10^{-2}
3	10	0	0.33	1.8×10^{-2}
3	10	5	0.43	9.2×10^{-2}
3	10	10	0.68	9.9×10^{-2}
4	10	0	0.57	4.2×10^{-2}
4	10	5	0.68	10.5×10^{-2}
5	10	0	0.56	3.6×10^{-2}
5	10	5	0.71	—
6	10	0	0.43	3.0×10^{-2}
6	10	5	0.63	7.4×10^{-2}
6	10	10	1.17	1.54

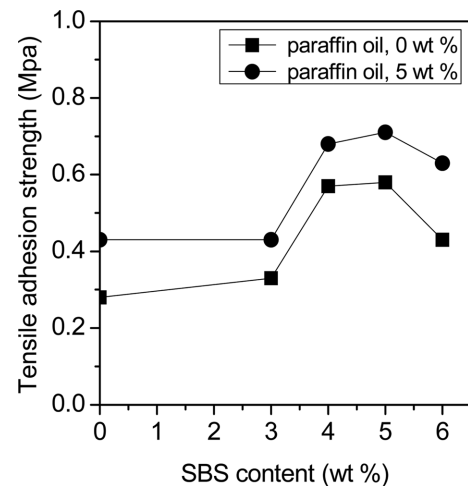


Fig. 4. Tensile adhesion strength for paraffin oil modified SBS/CR/asphalt blends, CR content 10 wt % at -20°C .

오일 첨가에 따른 SBS/CR 개질 아스팔트의 저온인장접착력을 Table 4와 Fig. 4와 5에 나타내었다. 파라핀 오일을 첨가한 CR/SBS 개질 아스팔트는 CR과 SBS로만 개질한 아스팔트에 비해 저온인장접착 강도가 증가하였다. SBS의 함량이 6 wt %에서 아스팔트 바인더 안에서 SBS가 연속 상을 보였으며, 파라핀 오일의 첨가량이 5 wt %와 10 wt %에서 접착강도가 각각 1.5배와 2.7배 증가하였다. 이는 파라핀 오일의 첨가에 의해 SBS의 분산이 증가하여 고무상으로 상전이 되어 응력에 대한 소성변형의 증가에 따라 접착인장강도가 증가함을 알 수 있다. 이는 침입도와 침입도지수의 실험결과와 같은 경향임을 알 수 있다. 모든 CR/SBS 개질 아스팔트는 접착계면에서 파괴가 일어나는 접착파괴(adhesive failure)가 일어남을 관찰하였다. 파라핀 오일의 첨가에 의한 저온인장접착력은 CR과 SBS로만 개질한 아스팔트에 비해 저온인장접착력이 증가하는 결과를 보였다. 따라서 피착제(adherend)와 접착제(adhesive)간의 계면접착력이 증가해도 SBS와 아스팔트 바인더의 소성변형이 균일하지 않으면 소성변형이 극소 부분에서 피착제와 SBS/CR 개질 아스팔트 블렌드의 계면에서 급격한 접착파괴가 발생하였다. SBS의 분산성저하는 고분자 개질 아스팔트 유연성의 감소에 따라 저온에서 고무특성을 보이는 폴리부

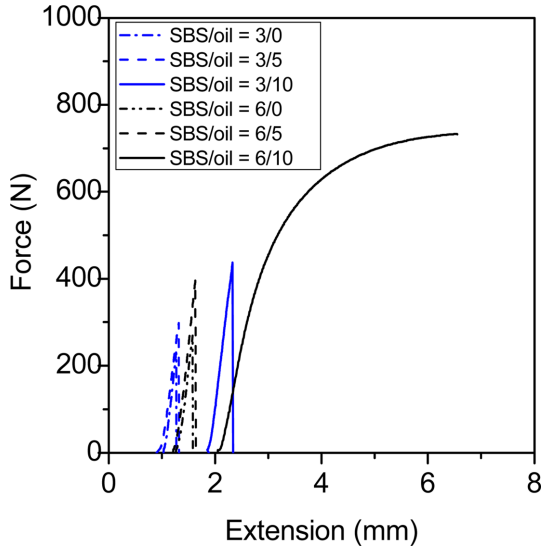


Fig. 5. Tensile adhesion force for paraffin oil modified SBS/CR/asphalt blends, CR content 10 wt % at -20°C .

타디엔 블록에 의한 소성변형이 충분하게 일어나지 않음을 알 수 있다. 따라서 파라핀오일에 의한 CR/SBS 개질 아스팔트 블렌드에서 SBS의 균일한 분산은 고무상 개질 아스팔트의 소성변형을 증가시킨 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 페타이어 고무분말(crumb rubber) 및 SBS와 아스팔트를 기본성분으로 하고 SBS 함량을 3~6 wt %로 변화하여, 각각 SBS/CR아스팔트 블렌드에 파라핀오일을 첨가하여 침입도, 연화점과 저온접착특성에 미치는 효과를 알아보았고 시험분석 결과는 아래와 같다.

(1) SBS의 함량이 6 wt %로 개질한 SBS/CR아스팔트는 순수한 아스팔트 바인더에 비해 침입도가 77에서 45로 감소하여 소성변형에 대한 저항성이 증가하였으며, 저온접착인장강도가 2.3배 증가하였다.

(2) 형광현미경분석에서 페타이어고무분말을 활용한 SBS/CR 개질 아스팔트는 CR이 아스팔트 바인더 안에서 팽윤이 되어 있으며, 파라핀 오일에 의해 SBS가 아스팔트 바인더 안에 잘 분산되었음을 관찰하였다.

(3) 저온인장접착력이 CR/SBS 개질아스팔트는 SBS 함량이 4 wt %에서 0.57 MPa로 CR 10 wt %로만 개질한 아스팔트에 비해 2.0배 파라핀 오일이 첨가된 경우는 0.68 MPa로 2.43배 증가하였으며, 이는 파라핀오일이 아스팔트의 말덴 성분을 용해하고 CR과 SBS의 부타디엔사슬의 길이를 증가시켰으며, 이는 아스팔트 바인더 내에 CR과 SBS의 분산성과 상용성이 개선되었음에 기인한다. SBS 함량이 6 wt %에서 파라핀오일의 양이 증가함에 따라 저온접착강도와 강인성이 증가하였으며, 파라핀 오일 함량이 10 wt %에서 저온접착강도는 1.17 MPa으로 2.72배와 강인성은 1.54 N·m로 51.3배 증가하였다. 이는 응력에 대한 변형률의 특성에서 고무상 거동을 보여 저온에서도 소성변형이 충분히 일어남을 알 수 있다. 파라핀 오일이 고무 개질 아스팔트에 대한 개질제로서의 사용가능성이 우수함을 확인하였다. 그러나 SBS 함량이 6 wt % 이상의 함량에서는 급격한 점도상승이 일어나기 때문에 SBS의 함량을 계속적으로 증가시킬 수 없다는 문제점이 있다.

참고문헌

1. Takamura, K., "Methods of Rejuvenating Road Surfaces with Polymer Modified asphalt Emulsion," US Patent 7357594 (2008).
2. Freeman, R. B. and Johnson, D., "Cost Effectiveness of Crack Sealing Materials and Techniques for Asphalts Pavement," FHWA/MT-98-007/8127, Western Trans. Inst., Montana State University, Bozeman, Mont.(1999).
3. Harvey, J. A. F. and Cebon, D., "Fracture Tests on Bitumen Films," *J. Mater. Civil Eng.*, **17**, 99 (2005).
4. Lee, S. J., Amirkhanjan, S. N., Putman, B. J. and Kim, K. W., "Laboratory Study of the Effects of Compaction on the Volumetric and Rutting Properties of CRM asphalt Mixtures," *J. Mater. Civil. Eng.*, **19**, 1079(2007).
5. K. J. O and Kim, J. S., "Influence of Processing Conditions on the Physical Properties of Crumb Rubber Modified Asphalts," *J. Korean Soc. Road Eng.*, **10**, 239(2008).
6. Kim, J. S., "Influence of a Flexibilizer on Physical Properties of Crumb Rubber Modified Asphalt Sealants," *Journal of Korean Society Road Engineers.*, **11**, 33(2009).
7. Kraus, G., "Modification of Asphalt by Block Polymer of Butadiene and Styrene," *Rubber Chem. Technol.*, **55**, 1389 (1982).
8. Morrison, G. R. and Hesp, S. A. M., "A New Look at Rubber Modified Asphalt Binders," *J. Mater. Sci.*, **30**, 2584(1995).
9. Kim, G. and Libera, M., "Morphological Development in Solvent Cast Polystyrene-polybutadiene-polystyrene (SBS) Triblock Copolymer Thin Films," *Macromolecules*, **31**, 2569(1998).
10. Blanco, R., Rodriguez, R., Garcia-Garduno, M. and Castano, V. M., "Rheological properties of Styrene-butadiene Copolymer Reinforced Asphalt," *J. Appl. Polym. Sci.*, **61**, 1493 (1996).
11. Hernandez, G., Medina, E. M., Sanchez, R. and Mendoza, M., "Thermomechanical and Rheological Asphalt Modification Using Styrene-butadiene Triblock Copolymers with Different Microstructure," *Energy Fuels.*, **20**, 2623(2006).
12. ASTM D5-06, Standard test method for penetration of bituminous materials(2006).
13. Pfeiffer, J. P. and Doormaal, P. M., "The Rheological Properties of Asphaltic Bitumen," *Journal of the Institute of Petroleum Technologists*, **22**, 414(1936).
14. ASTM D36-06, Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (ring-and-ball apparatus)(2006).
15. ASTM D-5329-07, Standard test methods for sealants and fillers, hot applied, for joints and cracks in asphaltic and portland cement concrete pavements(2007).
16. Morrison, G. R., Lee, J. K. and Hesp, S. M., "Chlorinated Polyolefin for Asphalt binder Modification," *J. Appl. Polym. Sci.*, **54**, 234(1994).
17. Gawel, I., Stepkowski, R. and Czechowski, F., "Molecular Interactions Between rubber and Asphalt," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, 3044(2006).
18. Yamaguchi, D., Cloitre, M., Panine, P. and Leibler, L., "Phase Behavior and viscoelastic Properties of Thermoplastic Elastomer Gels Based on ABC Triblock copolymers," *Macromolecules*, **38**, 7798(2005).