한국도로학회 논문집
제11권제3호 2009년 9월
pp. 33 ~ 40

폐타이어 고무분말 개질 아스팔트 실란트의 물리적 특성에서 유연제의 영향

Influence of a Flexibilizer on Physical Properties of Crumb Rubber Modified Asphalt Sealants

김 종 석*
Kim, Jong-Seok

Abstract

The use of the crumb rubber as an asphalt binder modifier may contribute to road maintenance and repair. The adhesion properties of the crumb rubber modified asphalt (CRMA) sealant have attracted interest due to brittle and adhesion failure of asphalt binders at low temperatures. In this study, the influence of a flexibilizer as a modifier for CRMA at low temperatures was investigated. Their properties were measured using the penetration, the softening point, the tensile and tensile adhesion tests at low temperature. The tensile adhesion strength and the strain of CRMAs were increased with increasing ductile deformation of the CR and the asphalt binder in the flexiblizer modified CRMAs. It was found that the flexibilizer concentration was an important factor for tensile and adhesion properties of CRMAs at low temperatures.

Keywords : crumb rubber, flexibilizer, ductile deformation, low temperature adhesion

요 지

폐타이어 고무분말은 도로 유지 및 보수제로 아스팔트 바인더의 개질제로 사용되고 있다. 도로보수제인 폐타이어 고무분말 개질 아스팔트 (crumb rubber modified asphalt, CRMA) 실란트에 필요한 접착특성은 저온에서 아스팔트 바인더의 취성과 접착파괴특성 때문에 주목받고 있다. 본 연구에서는 저온에서 CRMAs의 개질제로서 유연제의 영향을 조사하였다. 저온에서 CRMAs의 특성은 침입도, 연화점, 인장 및 인장접착시험을 통하여 측정하였다. 유연제를 도입한 CRMAs에서 CR과 아스팔트바인더의 연성변형이 증가함에 따라 인장접착강도와 변형률이 증가하였다. 저온영역에서 CRMAs의 인장특성과 접착특성은 유연제의 함량이 중요한 요소임을 발견하였다.

핵심용어 : 폐타이어 고무분말, 유연제, 연성변형, 저온접착

* 정회원 · 전북대학교 공과대학 화학공학부 교수(E-mail : js-kim@chonbuk.ac.kr)

1. 서 론

전 세계에서 매년 도로에 사용되고 있는 아스팔트 바인더의 양은 9,000만 톤에 이르고 있다. 그 중 유럽과 북아메리카에서 66% 이상을 소비하고 있으며, 미국은 400만 마일의 도로를 아스팔트 콘크리트로 포장하고 있다. 선진국뿐만 아니라 국내의 아스팔트 콘크리트 도로의 재포장은 보수작업으로 인한 교통체증이 증가하고, 기존 아스팔트 콘크리트의 제거비용과 재포장에 따른 보수비용이 과다하게 지출되는 문제점을 갖고 있다. 따라서 기존 도로의 재포장에 비해, 유지보수제를 사용하여 도로의 유지기간을 연장하는 방법이 경제적으로 바람직한 방향이라 할 수 있다(Hand, et al. 2000, Takamura, 2008).

아스팔트 실란트는 도로에서 발생하는 균열에 대한 유지보수제로 사용되고 있으며, 도로 표층에 존재하는 수분, 염화칼슘 및 파편들의 침투를 막아 도로의 수명을 연장시킬 수 있다. 또한 저온에서 취성구조를 갖는 아스팔트바인더에 의한 균열이 발생하기 전에 소성변형이 일어나 도로표층균열이 더 이상 일어나지 않는 장점이 있다(Masson, et al. 2005; Hesp, et al, 2003). 미국과 유럽 등 선진국에서는 아스팔트 콘크리트 도로 및 교량 조인트 등의 유지보수제로 아스팔트 실란트의 사용량이 크게 증가하는 추세에 있다. 국내에서는 아스팔트 실란트에 대한 기술적 데이터가 축적되어 있지 않기 때문에 국내에 적합한 아스팔트 실란트를 개발하고 관련된 기술을 축적할 필요가 있다고 판단된다.

아스팔트바인더는 0℃이하인 저온영역에서는 취성(brittle)거동을 보인다. 저온영역에서는 아스팔트 바인더의 취성구조에 따라 균열이 발생한다(Harvey, et al. 2005). 저온영역에서의 균열과 고온영역에서 영구변형을 개선하기 위한 방법으로 폐타이어 분말(crumb rubber, CR)을 이용한 아스팔트혼합물에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(McGennis, et al. 1995). CR과 아스팔트바인더의 혼합온도, 혼합시간의 변화 등 공정조건의 변화에 따라 CRMA의 온도 민감성을 예측할 수 있는 침입도 지수와 저온인장접착강도와 강인성에 관한 내용을 이미 발표한 바 있다(김종석, 2008). 아스팔트바인더에서 CR의 함량에 따른 CRMA의 물리적 특성이 변화함을 보고한 바 있다(Navarro, et al. 2005). 이러한 결과들은 온도와 CR의 영향에 따른 CRMA의 점탄성 특성과 저장안정성을 보여주고 있다.

본 연구에서는 CRMA의 저온영역에서 접착특성을 개선하기위한 개질제로 유연제(flexibilizer)를 사용하였다. 유연제의 함량 변화에 따라, CRMA와 피접착제 간의 저온접착특성이 변화될 것으로 예측하였다. 일반적으로 유연제는 CR내에 존재하는 고무성분의 팽윤을 증가시키거나 용해시키는 작용을 하는 것으로 알려져 있다. 또한 아스팔트 바인더의 연성을 증가시키는 유연제로도 사용되고 있다. 저온에서 유연제 함량의 변화에 따른 CRMA의 침입도, 연화점, 인장접착강도와 강인성 및 인장특성 등의 실험을 수행하여 그 결과를 나타내었다.

2. 재료 및 실험

2.1 재료

바인더로 사용된 아스팔트는 SK사의 침입도 등급이 80-100인 스트레이트 아스팔트를 사용하였으며, 침입도와 연화점을 표 1에 나타내었다. 아스팔트바

표 1. Properties of CR and Flexibilizer modified Asphalt Sealants as Flexibilizer Contents

Composition (wt%)		Processing Condition	Pen. at 25℃ (0.1mm)	Softening Point (℃)	PI
CR	R-3				
0	0	-	100	48	-0.70
10	0	210℃, 1hr	70	63	1.13
10	2	210℃, 1hr	130	56	1.43
10	5	210℃, 1hr	198	48	1.77
10	10	210℃, 1hr	166*	42	2.02
10	15	210℃, 1hr	320*	40	1.98

* Penetrations were measured at 15℃

인더의 개질제는 CR을 사용하였으며, 입자크기가 30mesh인 CR을 자원재생공사에서 구입하여 사용하였다. 아스팔트 유연제는 로드씰 주식회사에서 제공한 파라핀계 오일인 R-3을 사용하였다.

2.2 유연제 개질 CRMA의 제조

AP-3는 원료 그대로 사용하였으며, CR표면에 존재하는 수분을 제거하기 위해 80℃에서 24시간 진공건조 하였다. 혼합반응조건은 아스팔트가 완전 용융되었을 때 개질제인 CR을 아스팔트에 대해 10wt%를 소량씩 나누어 첨가하여 혼합반응 시켰다. 혼합반응조건은 600rpm의 교반속도로 210℃의 온도에서 반응시간을 1시간으로 하였다. 유연제 함량에 따른 CR의 물리적 특성을 조사하기 위해 아스팔트바인더에 대해 유연제 2-15wt% 첨가한 후 CR 10wt%를 소량씩 나누어 첨가하고 600 rpm의 교반속도로 교반하며 210℃에서 반응시간을 1시간으로 하였다.

2.3 침입도 및 연화점 측정

침입도의 측정은 ASTM D5에 따라 7회 이상 반복하여 침입도 값을 측정하였으며, 최대 침입도 값과 최소 침입도 값을 제외한 5개의 침입도 측정치를 평균한 값을 침입도로 결정하였다. CR 개질 아스팔트의 온도 민감성을 평가하기 위해 침입도 지수(penetration index, PI)를 Pfeiffer가 제안한 실험식으로부터 계산하였다(Pfeiffer et al. 1936, Morrison et al. 1994).

각 온도에서 침입도를 측정하여 측정온도 대 침입도의 반로그 좌표로부터 직선관계를 얻었다. 좌표에 나타난 직선의 기울기 A는 1) 식으로부터 구하였다.

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

A를 (2) 식에 대입하여 침입도 지수를 구하였다.

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

연화점의 측정은 ASTM D36에 따라 3회 이상 반복하여 연화점을 측정하였다.

2.4 인장접착력의 측정

저온에서 개질 아스팔트의 인장접착력은 ASTM D5329에 따라 측정하였다. 시험시편은 화강암블록(13mm×25mm×50mm)을 제작하였다. 화강암 블록은 시험 전 표면의 불순물을 제거하기 위해 아세톤으로 세척 후 상온에서 2시간 건조하여 사용하였다. 두 개의 화강암블록 양쪽 끝에 12.5mm×12.5mm×25mm 크기의 대리석 블록지지대를 설치한 후 빈 공간에 CR 개질 아스팔트를 채운 뒤 상온에서 24시간 냉각하였다. 시험시편을 -20℃에서 2시간 이상 유지한 다음 측정하였다. -20℃에서 만능시험기를 이용하여 crosshead speed는 12.5mm/min로 유지하면서 3회 이상 반복하여 인장접착강도와 변형률을 측정하였다. 인장접착력의 실험결과로부터 얻은 변형률과 인장접착강도 곡선을 적분하여 접착강인성을 구하였다.

2.5 인장강도와 탄성률의 측정

시험시편은 ASTM D 638에 따라 측정하였다. 이형지와 몰드를 이용하여 시험시편의 너비는 10mm, 두께는 2mm 및 길이는 70mm의 바 형태로 제작하였다. 시험시편은 -20℃에서 2시간 이상 유지한 다음 측정하였다. 만능시험기를 이용하여 crosshead speed는 5mm/min로 유지하면서 7회 이상 인장시험을 반복하여 수행하고 해당 값을 측정하였다. 유연제의 함량에 따른 CRMA의 인장 모듈러스와 강도를 각각 구하였다.

3. 결과 및 고찰

CRMA의 연화점과 침입도는 CR의 물리적 특성

과 함량에 의존한다(Palit et al. 2004). CR 개질 아스팔트는 아스팔트바인더에 비해, 침입도는 감소하는 반면, 연화점은 증가하는 경향을 보이고 있다. 아스팔트바인더의 연성은, 포장용 아스팔트뿐만 아니라 도로 및 교량 유지보수제로 사용되고 있는 아스팔트 실란트에 가장 필요한 물리적 특성이다(김종석 et al. 2008). CR 개질 아스팔트에서 아스팔트바인더와 CR간의 계면에서 팽윤(swelling)은 CR 개질 아스팔트의 물리적 특성이 변화하는 주요한 요인이 된다. 따라서 CR의 입자크기가 아스팔트바인더와 CR간의 계면에서의 물리적 특성을 좌우하는 중요한 변수임을 알 수 있다.

Miknis(1998)등은 CR의 팽윤에 미치는 변수들을 평가하기 위해, CRMA에서 각각 시간의 변화에 따라, CR의 팽윤 변화를 측정하였으며, 반응시간이 증가함에 따라 아스팔트바인더에서 CR의 팽윤이 증가함을 나타냈다. 이러한 결과는 아스팔트바인더의 오일성분이 CR내의 NR과 SBR을 팽윤시켜, 아스팔트바인더와 CR의 계면접착을 증가시키는 것으로 판단된다. CR첨가는 아스팔트바인더의 유연성을 증가시킨다(Navarro, et al. 2005). 유연제의 첨가량변화에 따라 CRMA의 침입도와 연화점의 변화를 측정하였다.

일반적으로 CR 개질 아스팔트의 혼합온도가 170℃에서 200℃가 안정적인 혼합반응온도라 알려져 있는데, 혼합반응온도가 210℃에서 CR개질 아스팔트혼합물의 저장안정성이 가장 큰 것으로 예측되었다(Navarro et al. 2007). 유연제가 아스팔트바인더와 CR에 미치는 영향을 확인하기 위해 CRMA의 연화점과 침입도 및 침입도 지수를 확인하였다. 반응온도가 210℃인 조건에서 반응시간이 1시간에서의 물리적 특성을 표 1에 나타내었다. 유연제의 함량이 증가할수록 침입도는 증가하고 연화점은 감소함을 나타내었다. 유연제의 함량이 10% 이상에서는 CRMA의 침입도를 25℃에서 측정 할 수 없어 15℃에서 측정하였다. 또한 온도 민감성을 나타내는 침입도지수가 증가하였다. 이러한 결과로부터 유연제에 의해 CR의 팽윤이 증가되어 침입도가 증가한 것으로 판단된다. 유연제인 R-3로 개질된 CRMA는 CR개질 아스팔트바인더에 비해 연화점은 감소하고, 침입도는 증가하는 결과를 보였다. 이는 유연제가 CR과 아스팔트바인더에 침투하였음을 알 수 있다.

온도변화에 따른 아스팔트바인더의 인장접착특성을 그림 1과 2에 나타내었다. 온도가 감소함에 따라 접착강도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 -5℃에서 접착강도가 급격하게 감소함을 나타내었다. 저온영역에서 아스팔트바인더는 응력에 따라 변형률의 증가 없이 파괴되는 취성거동을 보였다. 일반

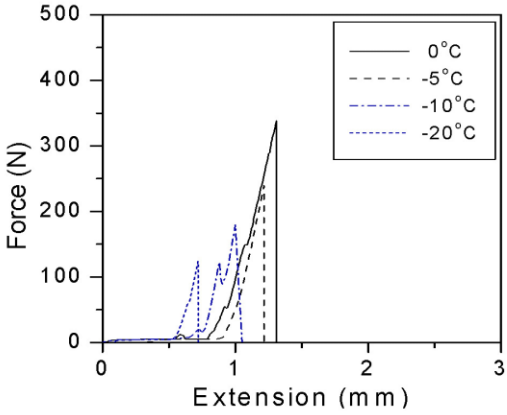

그림 1. Tensile adhesion forces of an asphalt binder at low temperatures

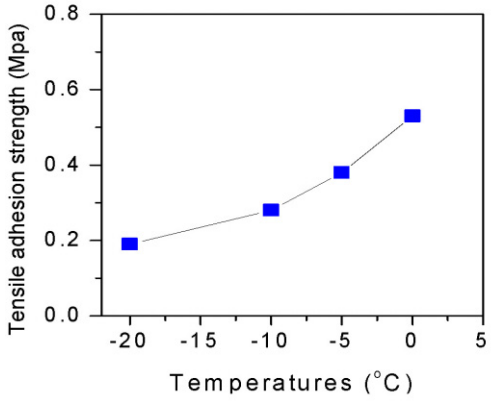

그림 2. Tensile adhesion strengths for an asphalt binder at low temperatures

적으로 아스팔트바인더는 0℃미만에서 취성파괴를 일으키는 것으로 알려져 있다. 인장접착강도의 곡선으로부터 구한 접착 강인성을 표 2에 나타내었다. 아스팔트바인더는 피접착제인 석재표면에서 떨어지는 접착파괴현상을 보였다. 0℃에 비해 -20℃에서의 접착강도는 2.7배 감소하였으나, 접착 강인성은 4.9배 감소한 결과를 나타내었다. 이 결과로부터 온도가 감소함에 따라 아스팔트바인더는 접착강도도 감소하지만 접착 강인성이 더욱 크게 감소함을 알 수 있다.

표 2. Tensile Adhesion Properties of Asphalt Binder at Low Temperatures

Temperatures (℃)	Tensile adhesion strength (MPa)	Toughness energy (N.mm)
-20	0.20	15.8
-10	0.28	28.5
-5	0.38	35.2
0	0.53	77.9

아스팔트바인더의 물성개선을 위하여 사용되는 개질제는 고분자탄성체와 유연제로 분류할 수 있다. 고분자탄성체는 아스팔트바인더의 탄력성과 유연성을 부여 시키는 반면 유연제는 안정성과 강인성을 향상시킨다 (이상진 1997). 고분자 탄성체인 CR의 함량을 10%로 고정시키고 혼합반응온도가 180℃와 210℃에서 만든 시편에 대해서 -20℃에서 측정한 인장접착강도와 접착 강인성을 표 3에 나타내었다. 혼합반응온도가 210℃는 180℃보다 인장접착강도는 14%와 강인성이 21% 증가하였다. 혼합반응온도 변화에 따른 CRMA의 저온접착특성은 크게 개선되지 않음을 알 수 있다. CR의 함량을 10%로 고정시키고 -20℃에서 유연제의 함량에 따른 CRMA의 변형률과 인장접착강도의 변화를 그림 3, 4 및 5에 나타내었다. 인장접착강도와 접착 강인성은 유연제의 함량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 유연제

표 3. Tensile Adhesion Properties of CR modified Asphalts at -20℃ as Processing Temperatures

Composition (wt%)		Processing Condition	Tensile adhesion strength (MPa)	Toughness energy (N.mm)
CR	R-3			
0	0	-	0.20	16
10	0	180℃, 1hr	0.28	19
10	0	210℃, 1hr	0.32	23

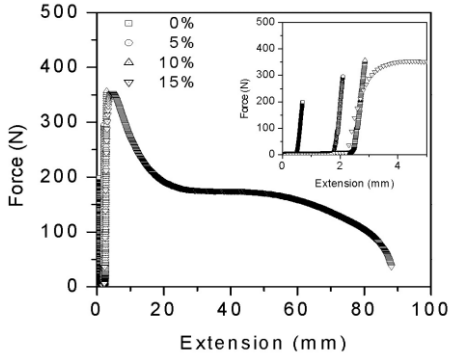

그림 3. Tensile adhesion forces of flexibilizer modified CRMA at -20℃,(CR content 10wt%).

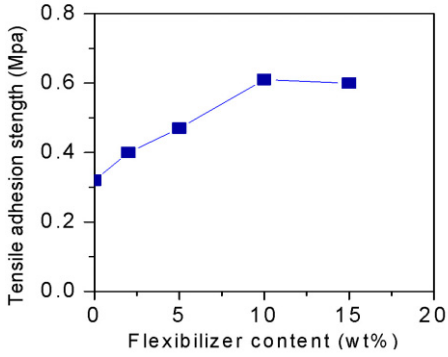

그림 4. Tensile adhesion strengths of flexibilizer modified CRMA at -20℃, (CR content 10wt%).

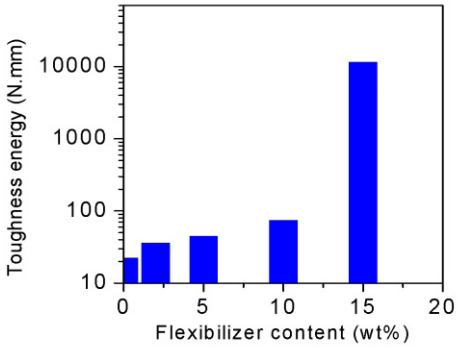

그림 5. Tensile adhesion toughness energies of flexibilizer modified CRMA at -20℃,(CR content 10wt%).

의 함량이 15%인 CRMA는 CR개질 아스팔트에 비해 변형률이 7.5배 증가하는 결과를 보였다. 이는 파라핀계 오일의 CR내 고무성분에 대한 분자간 확산에 의해 팽윤이 크게 증가되어 CRMA가 저온에서 연성을 나타냄을 알 수 있다. CR의 함량을 10%로 고정시키고 유연제의 함량에 따른 CRMA의 인장접착강도와 강인성 값을 표 4에 나타내었다. 유연제 개질 CRMA에서 저온접착강도는 유연제의 함량이 5%에서 1.5배 증가하였으며, 유연제의 함량이 10%에서는 1.9배까지 증가하였다. 저온접착강인성은 유연제의 함량이 5%에서는 2배, 15%에서는 514배로 크게 증가하였다. 유연제 개질 CRMA의 접착강인성은 유연제의 함량이 증가할수록 기하급수적으로 증가하였음을 알 수 있다. 유연제로 개질한 CRMA는 동일한 접착강도에서 유연성이 클수록 파괴접착강도까지 도달하는 길이인 최대접착변형률이 증가된 것으로 판단된다.

표 4. Tensile Adhesion Properties of Flexibilizer modified CRMA at -20℃ as the Flexibilizer Content

Composition (wt%)		Processing Condition	Tensile Adhesion Strength (MPa)	Toughness energy (N.mm)
CR	R-3			
0	0	-	0.20	16
10	0	210℃, 1hr	0.32	23
10	2	210℃, 1hr	0.40	37
10	5	210℃, 1hr	0.47	46
10	10	210℃, 1hr	0.61	76
10	15	210℃, 1hr	0.60	11,810

CR의 함량을 10%로 고정시키고 유연제의 함량에 따른 CRMA의 인장강도와 인장 모듈러스를 표 5에 나타내었다. 유연제를 첨가한 CRMA는 유연제의 함량이 5%이상에서 인장강도와 인장 모듈러스가 급격하게 변화됨을 보였다. 일반적으로 연성을 갖고 강인한 물질은 낮은 탄성률, 낮은 항복응력, 보통의 신도를 가진다. 유연제의 함량이 10%에서 CRMA의 인장강도는 2.3배 증가하였으며, 인장 모듈러스는 6.3배 감소함을 보였다. 이는 저온에서 CRMA의 인장강도가 개질 아스팔트의 인장강도 보다 약하기 때문에 일어나는 현상이다. 인장특성에서 온도는 응력-변형 특성에 크게 영향을 주는 인자이다. 저온에서 접착제의 항복강도와 변형률의 증가는 접착에너지를 증가시키며, 접착제 고유의 접착력과 점착력은 피착제와 접착제간의 계면파괴가 발생하기 전에 외부의 응력을 흡수하는 역할을 한다 (Kinloch, 1987). 유연제의 함량이 15%에서 CRMA는 취성접착파괴에서 연성변형으로 전이됨을 보였다. 따라서 유연제의 함량이 15%에서 저온접착특성이 크게 개선됨을 알 수 있다. 유연제인 파라핀오일의 지방족 탄화수소가 아스팔트바인더와 CR의 고무성분을 결합시키는 역할을 하여 CR과 아스팔트바인더간의 계면접착력을 증가시킴으로써 강인성을 증대하는 데 결정적인 역할을 한 것으로 생각된다. 유연제의 존재는 강인성을 증가시키는 반면에 인장 모듈러스를 감소시키는 것을 알 수 있다. 유연제의 도입에 의한 저온접착의 증가는 유연한 CR의 존재에 의하여 CRMA의 소성변형을 유도함으로써 접착파괴에너지를 흡수하는 것으로 사료된다. 이러한 결과들로부터 유연제로 개질한 CRMA의 인장 모듈러스가 작을수록 저온인장접착특성이 우수함을 확인 할 수 있었다.

표 5. Tensile Properties of Flexibilizer modified CRMA at -20℃ as the Flexibilizer Content

Composition (wt%)		Processing Condition	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (Mpa)
CR	R-3			
0	0	-	0.25	49.64
10	0	210℃, 1hr	0.37	38.10
10	2	210℃, 1hr	0.39	16.07
10	5	210℃, 1hr	0.49	7.51
10	10	210℃, 1hr	0.84	6.02
10	15	210℃, 1hr	0.58	5.60

4. 결 론

폐타이어 고무분말(crumb rubber)과 아스팔트바

인더를 기본성분으로 유연제의 양의 변화에 따른 물성변화를 조사하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유연제로 개질한 CRMA는 CR 개질 아스팔트에 비해 온도 민감성이 작음을 알 수 있었다.
2. 유연제의 도입에 따른 CRMA의 인장특성에서 유연제의 함량이 5%이상에서 인장강도와 탄성률이 급격하게 변화됨을 보였다. 유연제의 함량이 10%에서 CRMA의 인장강도는 2.3배 증가하였으며, 인장 모듈러스는 6.3배 감소함을 보였다.
3. 유연제로 개질한 CRMA의 인장 모듈러스가 작을수록 저온인장접착특성이 우수하였다
4. 유연제의 함량이 15%에서 CRMA는 취성접착파괴에서 연성변형으로 전이됨을 보였다. 따라서 유연제의 함량이 15%에서 저온접착특성이 크게 개선됨을 알 수 있다.
5. 유연제의 함량이 증가함에 따라 CRMA의 저온성질은 우수하나 중온 이상에서는 비교적 낮은 점도를 보였다.

참고 문헌

이상진, 이승진, 이진국 (1997), "탄상체로 개질된 아스팔트의 물리적 특성" **고무학회**, 32, 166-172.

오광중, 김종석 (2008), "폐타이어 고무분말을 개질 아스팔트의 물리적 특성에 대한 공정 조건", **한국도로학회**, 10, 239-246.

ASTM (2006) "*Standard test method for penetration of bituminous materials*" D5-06

ASTM (2006) "*Standard test method for softening point of bitumen(ring-and-ball apparatus)*" D36-06

ASTM (2007) "*Standard test methods for sealants and fillers, hot applied, for joints and cracks in asphaltic and portland cement concrerete pavements*" D5329-07

McGennis, R. B., (1995) "Evaluation of physical properties of fine crumb rubber-modified asphalt binders." *Transportation Research Record. 1488,* Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 62-71.

Takamura, K, (2008). "*Methods of rejuvenating road surfaces with polymer modified asphalt emulsion.*" US Patent 7357594

Freeman, R. B., and Johnson, D., (1999). "Cost effectiveness of crack sealing materials and techniques for asphalts pavement." *FHWA/MT-98-007/8127,* Western Trans. Inst., Montana State University, Bozeman, Mont.

Hand, A. J., Khaled, P. E., Galal, A.,Ward, D. R., and Fang, C., (2000) "Cost-effectiveness of joint and crack sealing: synthesis of practice" *Journal of Transportion Engineering,* 26, 521-529.

Masson, J-F., and Collins, P., Lowery, M., (2005) "Temperature control of hot-poured sealants during the sealing of pavement cracks" *Construction and Building Materials,* 19, 423-429.

Hesp. S.A.M., Roy, S. D., (2003) "How temperature and loading rate affect the yielding behavior in polymer-modified asphalt systems" *The International Journal of Pavement Engineering,* 4, 13-23.

Harvey, J. A. F., and Cebon, D., (2005) "Fracture tests on bitumen films" *Journal of Materials in Civil Engineering,* 17, 99-106.

Navarro, F. J., Pata. P., Martinez-Boza. F, and Gallegos. C., (2005) "Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen", *Energy & Fuels,* 19, 1984-1990.

Pfeiffer, J. P., Doormaal, P. M., (1936) "The rheological properties of asphaltic bitumen", *Journal of the Institute of Petroleum Technologists,* 22, 414-422.

Morrison, G., Lee, J. K., and Hesp, S. M., (1994) "Chlorinated polyolefin for asphalt binder modification." *Journal of Applied Polymer Science,* 54, 234-240.

Miknis, F. P, Michon, L. C., (1998) "Some applications of nuclear magnetic resonance imaging to crumb rubber modified asphalts", *Fuel,* 77, 393-397.

Kinloch. A. J., (1987) *"Adhesion and Adhesives"*, Chapman and Hall, London.

Palit, S., Reddy, S., and Pandey, B., (2004) "Laboratory evaluation of crumb rubber modified asphalt mixes." *Journal of Materials in Civil Engineering,* 16, 45-53.

Navarro, F. J., Patel, P., Martinez-Boza, F., and Gallegos, C., (2007) "Influence of processing conditions on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen." *Journal of Applied Polymer Science,* 104, 1683-1691.

접 수 일 : 2009. 3. 13
심 사 일 : 2009. 3. 18
심사완료일 : 2009. 7. 30