



# 페타이어 고무분말 개질 아스팔트의 물리적 특성에 대한 공정조건의 영향

## Influence of Processing Conditions on the Physical Properties of Crumb Rubber Modified Asphalts

오 광 중\*      김 종 석\*\*  
O, Kwang-Joong      Kim, Jong-Seok

### Abstract

In this study, the influence of reaction temperatures, mixing time and flexible modifier for crumb rubber modified asphalt (CRMA) as processing conditions were investigated. The temperature susceptibility and adhesion properties of neat and modified asphalts at low temperature measured using the penetration and tensile adhesion test. It was found that processing temperatures and flexible modifier were important factors for tensile adhesion strength and toughness energy at low temperature. The CRMA in the higher processing temperature and flexible modifier exhibited improved tensile adhesion properties which indicated the flexible structure of neat and modified asphalt binder. In general, the improvements of the physical properties in the CRMAs were due to the improvements of miscibility between CR and asphalt binder. It was found that the adhesion properties of the flexible agent modified CRMA were higher than CRMA were related to the flexible agent tend to penetrate into CR particles and asphalt binder.

*keywords : asphalt, crumb rubber, flexible modifier, processing temperature, low temperature adhesion*

### 요 지

본 연구는 페타이어 고무분말 개질 아스팔트 (crumb rubber modified asphalt, CRMA) 공정조건에서 반응온도, 혼합반응시간 및 유연성 개질제의 영향을 조사하였다. 저온에서 아스팔트바인더와 개질 아스팔트의 온도 민감성과 접착특성은 침입도와 인장접착강도를 통하여 측정하였다. 유연제와 공정온도가 인장접착강도와 강인화 에너지의 중요한 요소임을 확인하였다. 더 높은 혼합온도와 연성 개질제에서 CRMA의 인장접착물성이 향상되는 것은 아스팔트바인더와 개질 아스팔트의 연성구조에 기인한다. CRMA의 물리적 특성의 개선은 CR과 아스팔트바인더간의 상용성에 있다. 유연제가 CR과 아스팔트바인더 안에 침투되어, 유연제에 의해 개질된 CRMA는 CRMA보다 접착특성이 증가하였음을 확인하였다.

*핵심용어 : 아스팔트, 페타이어 고무분말, 유연성 개질제, 공정온도, 저온접착*

## 1. 서 론

아스팔트는 40℃에서 65℃의 고온 영역에서는 액체

와 같은 점성거동을, 0℃이하인 저온 영역에서는 취성 (brittle) 거동을 보인다. 따라서 아스팔트는 고온영역에서 외부하중에 따라 영구변형이 발생하고, 저온영역에

\* 비회원·전북대학교 생리활성물질연구소 전임연구원, 박사, E-mail: okchem@chonbuk.ac.kr

\*\* 정회원·전북대학교 화학공학부 부교수, 교신저자, E-mail: js-kim@chonbuk.ac.kr



서는 아스팔트 바인더의 취성구조에 따라 균열이 발생한다 (Harvey, et al, 2005). 이러한 온도변화에 따른 아스팔트 바인더의 변형, 즉 저온 영역에서의 균열과 고온영역에서 영구변형을 개선하기 위한 방법으로 페타이어 분말 (crumb rubber, CR)을 이용한 아스팔트혼합물에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다 (McGennis, et al, 1995., Lee, et al, 2007).

CR개질 아스팔트(CR Modified Asphalt, CRMA)는 일반 아스팔트에 비해 고온에서 높은 점도와 저온에서 강인성을 갖는다. 저온에서의 강인성은 저온균열에 대한 저항성이 강화 되며, 고무성분에 따른 온도에 대한 민감성이 향상되어 유연성과 고무탄성이 향상된다 (이경하, 2000).

현재 국내도로는 차량의 대형화와 교통량의 증가에 따라 도로의 파손과 노후화가 심각한 편이다. 파손되고 노후화된 도로를 보수하는 작업으로 교통체증이 증가하고, 보수비용이 과다 지출의 문제점을 갖고 있다. CR개질 아스팔트는, 이러한 문제점을 개선하기 위한 방안으로 검토되고 있다. CR개질 아스팔트는 안정성, 내산성 및 내균열성이 우수하여, 골재를 피복하는 막의 두께와 내산화성이 증가하여 포장수명이 증가하는 것으로 알려져 있다 (김진광, 1990).

그러나 국내에서 CR개질 아스팔트를 시험 포장을 한 결과, 기술적인 문제점이 노출되었다. 그 동안 아스팔트의 종류와 첨가제, 제조시간 및 온도의 변화에 따른 기술적 데이터가 축적되어 있지 않기 때문에, 문제점을 해결하기 위해서는 균일한 혼합을 위한 첨가제를 개발하고 관련된 기술적 데이터를 축적할 필요가 있다고 판단된다 (김진국, 1997).

본 연구에서는 CR과 아스팔트바인더간의 공정조건에 따라 CR과 아스팔트의 혼합의 적정온도, 혼합시간의 변화 및 유연제의 첨가 등 공정조건 변화에 따라 CR 개질 아스팔트혼합물의 온도 민감성을 예측할 수 있는 침입도 지수와 저온인장점착강도와 강인성에 대해 고찰하였다.

## 2. 재료 및 실험

### 2.1 재료

바인더로 사용된 아스팔트는 SK사의 침입도 등급이

80-100인 AP-3 스트레이트 아스팔트를 사용하였으며, 침입도와 연화점을 Table 1에 나타내었다. 아스팔트바인더의 개질제는 CR을 사용하였으며, 입자크기가 30 mesh인 CR을 자원재생공사에서 구입하여 사용하고, 80 mesh와 120 mesh는 Rouse Polymeric사의 CR을 구입하여 사용하였다. 국내에서 얻어지는 CR은 대형 타이어의 연마공정에 의하여 얻어지며, 고무성분에서 천연고무가 주성분으로 구성되었다. CR의 성분비를 Table 2에 나타내었다 (김진국, 1997). 아스팔트의유연제 (flexibilizer)는 로드실사의 파라핀계 점탄성 오일인 R-3을 사용하였으며, 유연제의 유동점은 -60℃이고, 25℃에서 점도는 200cP, 인화점은 265℃인 특성을 보였다.

Table 1. Properties of Asphalt

Test	Specification	Results	Specification limits
Penetration (0.1mm)	ASTM D5	100	80-100
Softening point (oC)	ASTM D36	48	42-50

Table 2. Characteristics of Crumb Rubber (CR)

Materials		wt%
Total rubber	NR/SBR/BR = 60/20/20	66
Carbon black		29
Ash		5

### 2.2 CR 개질 아스팔트의 제조

AP-3는 원료 그대로 사용하였으며, CR표면에 존재하는 수분을 제거하기 위해 80℃로 유지된 진공건조기에서 24시간 건조 하였다. 혼합반응조건은 아스팔트가 완전 용융되었을 때 개질제인 CR을 아스팔트에 대해 5wt%, 10wt% 및 15wt%를 소량씩 나누어 첨가하여 혼합반응 시켰다. 혼합반응조건은 600rpm의 교반속도로 180oC의 온도에서 최대반응시간을 각각 1시간과 3시간으로 하였다. 유연제에 따른 CR의 물리적 특성을 조사하기 위해 아스팔트 바인더에 대해 유연제를 2wt%첨가한 후 CR을 10wt%를 소량씩 나누어 첨가하여 혼합반응 시켰다. 혼합반응조건은 600rpm의 교반속도로 180℃ 및 210℃의 온도에서 최대반응시간을 각각 1시간과 3시간으로 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 개질아스팔트의 온도 민감성을 평가하기 위해 침입도 지수 (penetration index, PI)를 Pfeiffer 가 제안한 실험식으로부터 계산하였다(Morrisonet al. 1994).

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

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

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 콘크리트 블록 대신에 화강암블록(13mm X 25mm X 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 X 12.5mm X 25mm크기의 인조대리석 블록지지대를 설치한 후 빈 공간에 CR 개질 아스팔트를 채운 뒤 상온에서 24시간냉각하였다. 시험시편을 -20℃에서 2시간 이상 정치 시킨 다음 측정하였다. -20℃ 온도가 유지된 챔버가 설치된 만능시험기를 이용하여 crosshead speed는 12.5mm/min로 3회 이상 반복하여 측정하였다. 인장접착력의 실험결과로부터 얻은 변형율과 인장접착강도 곡선을 적분하여 접착강인성을 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

평균입자크기가 30 mesh인 CR로 고정시키고 CR의

함량에 따른 침입도와 연화점을 Table 3과 Figure 1에 나타내었다. 일반적으로 고분자 개질 아스팔트의 연화점과 침입도는 고분자 개질제의 물리적 특성과 고분자의 함량에 의존한다 (Palit et al. 2004). CR 개질 아스팔트는 아스팔트바인더에 비해, 침입도는 감소하는 반면, 연화점은 증가하는 경향을 보이고 있다.

침입도 지수는 아스팔트바인더의 온도 민감성을 나타내는 물리적 특성의 척도로 사용되고 있다. 온도 민감성은 아스팔트바인더를 이용한 도로포장 및 도로 보수재료들에 중요한 특성 중에 하나이다. 저온영역에서 아스팔트바인더는 골재와의 계면에서 분리와 공극에 침투된 수분의 영향으로 응력균열이 발생하게 된다. 따라서 아스팔트바인더의 연성은, 포장용 아스팔트뿐만 아니라 도로 및 교량유지 보수제로 사용되고 있는 아스팔트 실란트에 가장 필요한 물리적 특성이라 판단된다. 도로포장용 아스팔트바인더는 실험식을 통하여 구한 침입도지수가 -1에서 1의 범위를 나타내는 것으로 알려져 있다 (McGennis et al. 1995). 침입도 지수가 증가할수록 아스팔트 바인더의 온도 민감성이 감소한다. CR의 함량이

Table 3. The Properties of CR modified Asphalts

Property	Content (wt%)				
	0	5	8	10	1
Penetration at 25°C (0.1mm)	100	69	69	68	5
Softening point (°C)	48	55	55	63	6
Penetration index (PI)	-0.70	0.51	0.51	1.11	1.

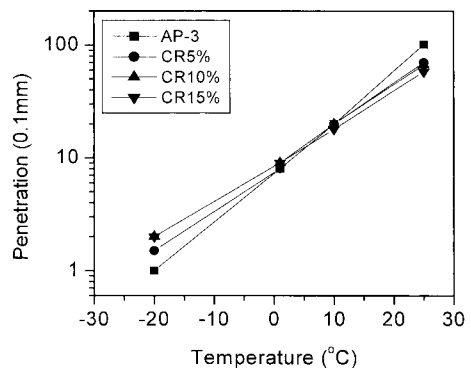


Figure 1. Variation of penetration of CR modified asphalts as a function of CR contents at 180°C, 1hr.



5wt%에서 침입도 지수가 아스팔트 바인더의 범위에 있음을 나타냈으나, 10wt%이상에서 침입도지수가 1이상을 나타내었다. 이러한 결과로부터 CR의 함량이 10wt% 이상에서 온도 민감성을 감소시키는 것을 알 수 있다.

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. 국내에서 생산되는 CR은 페타이어를 상온에서 연마하여 얻어진다. Rouse Polymerics사에서 생산되는 미세입자크기의 CR은 액체질소를 이용하여 냉온 분쇄법을 사용하여 생산하고 있다. 냉온 분쇄법을 이용한 CR은 상온 분쇄법에 비하여 미세한 CR입자를 얻을 수 있으며 상온에서 분쇄과정에서 발생하는 마찰열을 방지 할 수 있어 물성저하를 억제 할 수 있다. 입자크기가 작은 CR은 입자크기가 큰 CR에 비해 비표면적이 증가하여 아스팔트와의 계면에서 팽윤이 증가될 것으로 예측되었다. 평균입자크기가 80mesh와 120mesh를 갖는 CR의 연화점과 침입도를 측정하였다. CR의 입자크기와 함량에 따른 침입도와 연화점을 Table4에 나타내었다.

Table 4. Properties of CR modified Asphalts with various particle size of CR

Property	Type	Content (wt%)			
		0	5	8	10
Penetration at 25°C (0.1mm)	30 mesh	100	69	69	68
		48	55	55	63
Softening point (°C)	80 mesh	63	60	60	
		50	51	52	
Penetration at 25°C (0.1mm)	120 mesh	60	59	59	
		50	52	53	
Softening point (°C)	120 mesh	50	52	53	

입자평균크기가 30mesh인 CR에 비해 침입도가 감소한 값을 보였다. 이러한 결과로부터 평균 입자크기가 80mesh인 CR은 30mesh에 비해 온도 민감성이 향상되

었음을 알 수 있다. 또한 CR의 함량이 15wt% 이상에서는 CR의 입자크기가 감소할수록 점도가 상승하여 혼합반응이 어려웠다. 이는 아스팔트바인더 안에서 CR입자끼리 뭉치는 현상에 의해서, 급격한 점도 상승이 일어나는 것으로 판단된다.

아스팔트콘크리트로 포설한 도로에서 골재는 구조강도를 증가시키는 역할을 하며 아스팔트바인더는 골재들의 접착제 역할을 하는데, 도로의 균열은 주로 아스팔트바인더의 균열에 의한 표층균열의 전파에 의해 진행되는 것으로 알려져 있다 (Harvey et al. 2005). 따라서 저온영역에서 아스팔트바인더의 연성(flexibility)이 도로의 수명연장에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. Miknis (1998)등은 CR의 팽윤에 미치는 변수들을 평가하기 위해, 단독CR과 아스팔트바인더와 CR을 혼합하여 각각 가열온도를 175°C에서 시간의 변화에 따라, 팽윤의 변화를 측정하였으며, 반응시간이 증가함에 따라 아스팔트바인더에서 CR의 팽윤이 증가함을 나타냈다. 이 실험조건들은 교반 없이 고온에서 장시간 정치된 상태에서 팽윤을 측정하여 CR과 아스팔트바인더의 비침차이에 따른 상분리 현상을 간과하고 있다.

따라서 본 연구에서는 교반속도를 600rpm으로 하여 혼합반응이 지속적으로 이루어진 상태에서 혼합온도, 반응시간 및 유연제의 첨가에 따른 침입도와 연화점의 변화를 측정하였다. 반응온도가 180°C인 조건에서 반응시간이 1시간과 3시간에서 물리적 특성을 Table5와 Figure 2 및 Figure 3에 나타내었다.

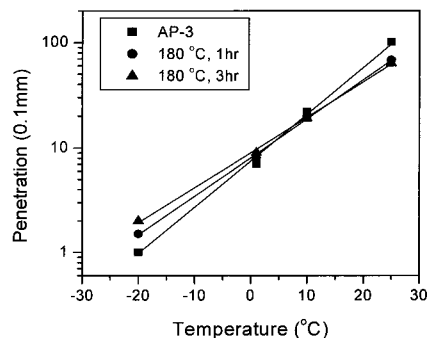


Figure 2. Variation of penetration of CR modified asphalts as a function of mixing time in the CR content (10wt%), 180°C.

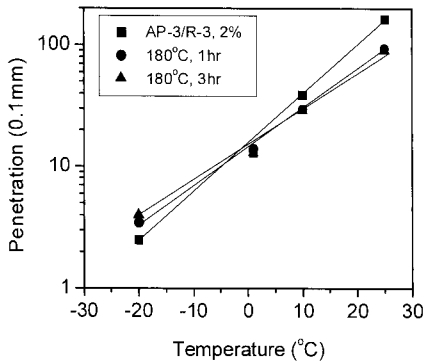


Figure 3. Variation of penetration of CR and R-3 (2wt%) modified Asphalts as a function of mixing time in the CR content (10wt%) at 180°C.

CR의 함량이 10wt%으로 개질한 아스팔트혼합물의 반응온도가 180°C의 결과에서는 반응시간 변화에 따라 침입도와 연화점의 변화가 거의 없음을 나타냈다. CR의 함량이 10wt%로 개질한 아스팔트혼합물에 파라핀계 오일을 2wt% 첨가한 경우, 연화점은 일정한 반면, 침입도는 감소함을 보였다. 또한 온도 민감성을 나타내는 침입도지수가 증가하였다. 이는 CR의 구성성분인 SBR과 NR에 오일성분이 확산되었음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 반응시간보다는 유연제에 의해 CR의 팽윤이 증가되어 침입도가 감소한 것으로 판단된다. 타이어의 제조에서도 가황공정에서 오일을 사용하고 있으며, 오일은 고무에 침투해 점도를 저하시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

R-3가 아스팔트바인더에 미치는 영향을 확인하기 위해 AP-3의 연화점과 침입도 및 침입도 지수를 확인하였다. R-3의 첨가에 의한 아스팔트는 아스팔트 바인더에 비해 연화점은 감소하였으나, 침입도지수가 증가한 결과를 Figure 4와 Table 5에 보였다. 오일이 침투하여 아스팔트의 수지성분인 maltents안에 분자간 확산이 일어남을 알 수 있다. 이 결과로부터 오일의 첨가에 의해 저온에서 고무탄성영역이 증가하여 아스팔트바인더의 연성이 증가될 것으로 예측된다. 이러한 분자간 확산에 의해 CR의 팽윤이 증가하고 아스팔트바인더와 CR간의 계면에서 상용성(miscibility)이 증가하여 CR 개질 아스팔트의 저장안정성이 증가한 것으로 판단된다 (Gawel et al. 2006).

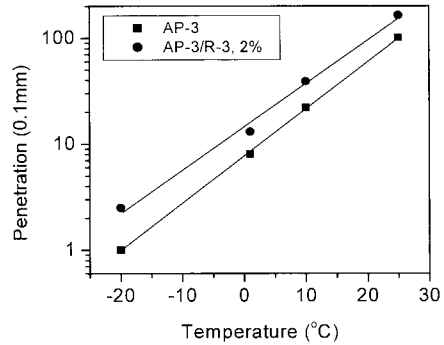


Figure 4. Variation of penetration of asphalts and R-3 (2wt%) modified asphalt.

Table 5. Properties of CR modified Asphalts as the Mixing time and Temperatures

Composition (wt%)		Processing Condition	Pen, 0.1mm	Softening point (oC)	PI
CR	R-3				
0	0	-	100	48	-0.70
10	0	180°C, 1hr	68	63	1.11
10	0	180°C, 3hr	67	62	1.13
0	2	180°C, 1hr	166	46	0.49
10	2	180°C, 1hr	96	56	1.54
10	2	180°C, 3hr	91	57	1.95
10	2	210°C, 1hr	130	56	1.43
10	2	210°C, 3hr	118	56	1.65

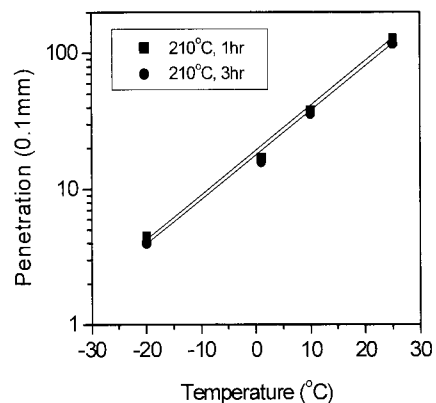


Figure 5. Variation of penetration of CR and R-3 (2wt%) modified asphalts as a function of mixing time in the CR content (10wt%) at 210°C.



일반적으로 고분자 개질 아스팔트의 혼합온도가 170℃에서 200℃ 까지 안정적인 혼합반응온도라 알려져 있는데, 혼합반응온도가 210℃에서 CR개질 아스팔트혼합물의 저장안정성이 가장 큰 것으로 예측되었다(Navarro et al. 2007). 혼합온도가 증가한 데 따른 물리적 특성을 확인하기 위해, 210℃에서 반응시간에 따른 침입도와 연화점을 측정된 결과를 Figure 5에 나타내었다.

혼합반응시간과 온도 따른 연화점은 변화하지 않았으나 반응온도에 따라 침입도가 크게 증가함을 보였다. 이는 혼합반응온도가 210℃에서 오일에 의한 CR의 해리가 가속화되면서 아스팔트혼합물의 연성이 증가한 것으로 생각된다.

아스팔트바인더의 기계적 성질에 가장 큰 영향을 주는 성분은 asphaltene이다. Asphaltene은 유리전이온도(glass transition temperature)가 -5℃ 이다 (Masson et al. 2005). Asphaltene은 저온에서 아스팔트바인더의 파괴를 발생시키는 성분이다. 따라서, 저온파괴를 개선하기 위한 방법으로는 아스팔트혼합물의 연성 증가에 따른 탄성률의 감소와 피착제인 골재 및 콘크리트의 계면에서 접착의 증가가 중요하다고 판단된다.

본 연구에서는 피착제를 골재성분과 유사한 화강암재질의 판재를 이용하여 저온에서 인장접착거동을 측정하였다. CR개질 아스팔트혼합물을 -20℃에서 측정된 접착인장강도와 강인성을 Table 6와 Figure 6 및 Figure 7에 나타내었다. 모든 CR개질 아스팔트 혼합물들은 석재의 표면에서 떨어지는 접착파괴(adhesive failure) 현상을 보였다. 이는 저온에서 개질 아스팔트혼합물과 석재 사이의 접착강도가 개질 아스팔트의 인장강도 보다 약하기 때문에 일어나는 현상이다. CR의 함량이 증가함에 따라 인장접착강도와 강인성이 증가하였으나, CR의 함량을 10wt%로 고정하여 혼합반응시간이 1시간과 3시간에서의 인장접착강도와 강인성은 유사한 결과를 보였다. 이는 침입도 지수 및 침입도의 결과와 일치하는 결과를 보이고 있다. 따라서 혼합반응시간에 따라서는 저온에서의 접착특성이 개선되지 않음을 알 수 있다.

이에 비해, 유연제인 R-3를 첨가한 개질 아스팔트의 경우 혼합반응시간이 증가함에 따라 인장접착강도는 25%이상 증가하고 접착 강인성은 100%가까이 증가하였

다. 이는 저온에서 유연제에 의한 소성변형이 증가하여 변형율이 증가한 것으로 생각된다. 혼합반응온도가 210℃는 180℃보다 인장접착강도는 62%와 강인성이 230% 증가하였다. CR과 아스팔트바인더간 팽윤이 증가할수록 연성이 증가하여 인장접착강도와 강인성이 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 결과들로부터 저온에서 온도 민감성을 향상시킨 CR 개질 아스팔트는 혼합반응시간보다는 혼합반응온도와 유연제가 더 효과적인 인자임을 알 수 있다. 침입도 지수와 저온인장접착특성이 부분적으로 서로 일치하지 않았으나 일반적으로 침입도 지수가 큰 값을 갖는 CR 개질 아스팔트일수록 저온인장접착특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

Table 6. Low Temperature Tensile Adhesion Properties of CR modified Asphalts as the Mixing time and Temperatures

Compositi on (wt%)		Processing condition	Tensile adhesion strength (MPa)	Toughne ss energy (N.mm)
CR	R-3			
0	0	-	0.198	15.8
5	0	180℃, 1hr	0.237	18.9
10	0	180℃, 1hr	0.278	23.5
10	0	180℃, 3hr	0.282	22.1
10	2	180℃, 1hr	0.243	16.1
10	2	180℃, 3hr	0.304	31.7
10	2	210℃, 1hr	0.395	36.9
10	2	210℃, 3hr	0.323	24.2

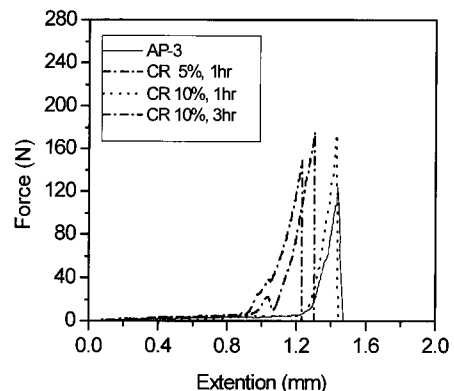


Figure 6. Low temperature tensile adhesion curves for CR modified asphalts at -20℃ as a function of mixing time and CR contents.

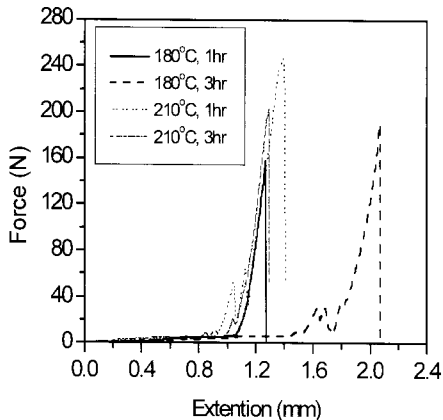


Figure 7. Low temperature tensile adhesion curves for CR and R-3 (2wt%) modified asphalts at  $-20^{\circ}\text{C}$  as a function of mixing temperatures and time.

#### 4. 결론

본 연구에서는 페타이어 고무분말(crumb rubber)과 아스팔트를 기본성분으로 하고 혼합반응시간, 혼합온도 및 유연제를 첨가한 공정조건에 따른 물성변화를 조사하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CR의 평균입자크기가 30mesh, 80mesh 및 120 mesh에서 침입도는 CR의 입자크기가 감소할수록 침입도가 감소하였다. CR의 비표면적이 증가함에 따라 CR의 팽윤이 증가하여 CR과 아스팔트바인더간의 상용성이 향상됨을 알 수 있었다.

2. 유연제에 의해 개질된 아스팔트혼합물은 아스팔트 바인더에 비해 온도 민감성이 작음을 알 수 있었다. 유연제를 첨가한 CR개질 아스팔트는 혼합시간이 증가함에 따라 저온인장접착 특성이 증가하였다.

3. CR 개질 아스팔트는 혼합반응온도가 180oC에서 반응시간의 변화에 따른, 침입도, 연화점, 저온인장접착 강도 및 강인성이 일정하였다. CR 개질 아스팔트에 유연제를 첨가한 아스팔트혼합물은, 반응온도가 210oC가 180oC에 비해 저온인장접착강도와 강인성이 크게 증가하였다. 혼합시간과 반응온도의 변화에 의한 공정조건에서 반응시간보다 반응온도가 증가함에 따라CR 개질 아스팔트의 저온특성이 향상되었다.

#### 참고문헌

- 김진광 (1990) "페타이어를 이용한 고무아스팔트 포장" 타이 어고무, 10-19
- 김진국 (1997) "페타이어 개질 고무 아스팔트" 고분자과학과 기술, 8, 754-760.
- 이경하 (2000) "CRM아스팔트의 바인더특성 분석", 한국도로 포장공학회지, 2, 123-133.
- 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 concrete 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.
- Harvey, J. A. F., and Cebon, D., (2005) "Fracture tests on bitumen films" *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17, 99-106.
- Lee, S. J., Amirkhanjan, S. N., Putman, B. J., and Kim, K. W., (2007) "Laboratory study of the effects of compaction on the volumetric and rutting properties of CRM asphalt mixtures" *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 1079-1089..
- 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.
- 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.

Gawel, I., Stepkowski, R., and Czechowski, F., (2006) "Molecular interactions between rubber and asphalt.", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 45, 3044-3049.

Masson, J., Polomark, G., Collins, P., (2005) "Glass transitions and amorphous phases in SBS-bitumen blends" *Thermochemica Acta*, 436, 96-100.

접 수 일 : 2008. 8. 6

심 사 일 : 2008. 8. 11

심사완료일 : 2008. 8. 27