



재생 아스팔트 바인더의 물리적 특성과 저온균열 저항성 연구

Physical Properties and Low Temperature Resistance of Recycled Binder

이 영 관* 김 준 은** 도 영 수*** 김 광 우****
Lee, Young Gwan Kim, J. E. Do, Young Soo Kim, Kwang Woo

Abstract

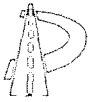
This study evaluated the asphalt binder characteristics for the hot-recycled asphalt mixture in which RAP was added in ambient temperature for surface course as well as for base course. RAPs were collected from four sources and their physical properties were evaluated. Mix designs were performed using 10 and 20% RAP contents for surface courses and 10, 20 and 30% for base courses. A virgin asphalt with the penetration grade of 60-80 was used for mixing recycled mixtures. Physical properties of recycled binders, including penetration, absolute viscosity, GPC, BBR and penetration after TFO were measured. From the results, regression analysis of absolute viscosity versus LMS in GPC showed R^2 being over 0.95, showing that GPC results estimate the absolute viscosity with relative accuracy. In BBR test, the resistance of recycled mixtures at low service temperature was inferior to the control, because the low temperature PG of recycled binder was one grade higher than that of the control binder.

Keywords : RAP, GPC, TFO, BBR, LMS, low temperature PG

요 지

본 논문은 상온상태의 폐아스팔트 포장재료를 가열재활용하여 기층용뿐만 아니라 표층용으로 활용함에 있어 재생 아스팔트 바인더의 특성을 연구한 것이다. 4종류의 RAP을 가지고 RAP 자체의 기본 물성을 시험하였다. 배합설계는 표층에는 RAP을 10, 20%를 첨가하였고, 기층에는 10, 20, 30%를 첨가하였다. 재생혼합물의 신규 바인더로는 AC 60-80을 선정하였다. 침입도, 점도, GPC, TFO, 저온균열 저항성을 평가하기 위한 BBR 실험을 수행하였다. 절대점도와 GPC에서의 대형입도분자(LMS)를 지수함수 회귀분석을 통해 R^2 이 0.95 이상이었

* 정회원 · 동성엔지니어링 · 공학석사
** 정회원 · 다우엔지니어링 · 공학석사
*** 정회원 · 강원대학교 석재복합연구센터 전임연구원 · 공학박사
**** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사



고 이것은 절대점도 추정에 GPC 결과가 상당히 정확함을 시사해주고 있다. RAP을 첨가한 재생 아스팔트 바인더의 PG 저온 등급은 일반 신규 바인더에 비해 한 단계 높은 등급을 나타내므로 저온균열에 대한 저항성은 약간 약한 것으로 나타났다.

핵심 용어 : RAP, GPC, TFO, BBR, 대형입도분자, PG 저온 등급

1. 서론

건설폐기물이 상당량 발생하지만 그 중 일부만이 재활용되는 것이 국내의 현실이다. 이러한 건설폐기물 중에서 페아스콘은 2000년 기준으로 450만톤(환경부, 2000)에 달하며, 이 막대한 양의 페아스콘의 재활용은 시급히 해결해야할 중요한 문제로 인식되고 있다. 특히 페아스콘의 재활용은 일반 신규 아스팔트 혼합물과 거의 같은 수준의 품질을 낼 수 있고 그에 따른 부가가치가 커서 미국과 유럽을 중심으로 지속적으로 이루어져 왔다. 미국의 경우 80% 이상의 아스팔트 포장에 재활용되고 있고(ARTS Quarterly 2001) 또한 가까운 일본에서도 아스팔트 포장재료의 재활용은 1980년대 이후 실용화 단계에 이르렀다. 하지만 국내에서는 이에 대한 연구가 이제 초기 단계에 있고 근래에 와서 부분적인 재활용장비 개발 및 플랜트 개발이 이루어지고 있는 실정이다.

페아스콘의 재활용 방법에는 여러 가지가 있고 이를 분류하는 방법에는 여러 가지가 있는데 작업장소와 작업형태(열처리 방법)에 따라 분류하는 방법이 대표적인 방법이다. 열처리 방법으로 분류하면 크게 가열혼합재활용(Hot-mix recycle), 상온혼합재활용(Cold-mix recycle), 중온혼합재활용(Foamed-mix recycle) 등으로 구분할 수 있다.

일반적으로 가열혼합재활용은 회수아스팔트 포장(Reclaimed asphalt pavement: RAP)을 사전에 가열하여 첨가하는데 이 방법은 플랜트에 별도의 간접가열장치가 필요하며 경제성과 다른 여러 면에서 어려움이 있다. 하지만 출하되는 재생혼합물의 온도 관리만 잘 할 수 있다면 상온의 RAP을 적은 비율이

지만 사전 가열장치 없이 직접 넣음으로써 RAP 자체의 노화를 최대한 억제하고 환경보호와 경제성에서 유리한 가열혼합재활용 방법을 제시할 수 있다. RAP과 재생 아스팔트 바인더의 연구를 통해서 페아스콘의 재활용에 대한 체계적인 연구와 표준화된 가열혼합재활용 방법을 제시할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 국내에서 다량으로 발생하고 있는 페아스콘을 회수 처리한 RAP을 상온상태에서 가열혼합 플랜트에 넣어 재활용함에 있어 아스팔트혼합물의 결합재 역할을 하는 가장 중요한 재료인 바인더에 대한 특성을 검토하는 것이다. 이를 위해 RAP 자체의 기본 물성과 RAP에서 추출·회생한 바인더 특성, RAP을 첨가한 재생 아스팔트 바인더의 특성을 비교·분석하여 그 특성을 평가하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용재료

2.1.1 회수 아스팔트 혼합물

본 연구에서는 1차적으로 무작위로 채취한 샘플의 회수아스팔트 혼합물(Reclaimed Asphalt Pavement: RAP)의 상태를 아스팔트 함량과 노화상태 별로 여러 가지로 나누고, 상온 RAP를 첨가할 수 있는 적정량과 신규 아스팔트의 적정 첨가량을 정하였다. 이를 위해 4가지 RAP-1~RAP-4를 경인 지역에서 수집했으며 우선 수집된 4가지의 RAP을 직접 사용하기 편리하도록 13mm 이하로 파쇄하여 사용하였다(그림 1). 이에 대한 기본물성은 표 1과 같다.

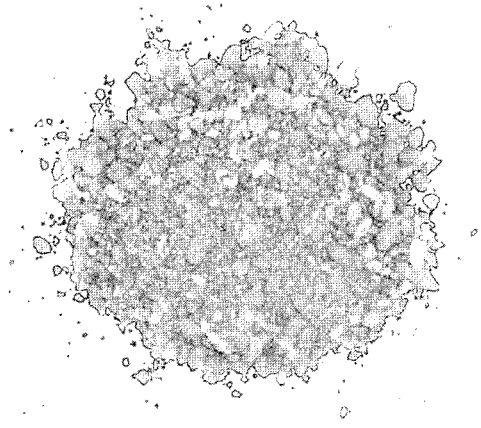


그림1. RAP passing 13mm sieve

표 1. Properties of RAP

Classification	Asphalt content (%)	Moisture content (%)
RAP-1	5.6	3.2
RAP-2	5.6	3.4
RAP-3	6.1	1.3
RAP-4	5.2	4.8

2.1.2 결합재

재생혼합물의 배합설계에 사용된 아스팔트는 일반 플랜트에서 주로 사용하는 바인더인 국내산 AC 60-80을 이용하였으며 그 품질 시험 결과는 표 2와 같다.

2.1.3 골재

신규골재는 경기 중부지역에서 생산되는 화강암계 통의 골재로써 최대치수 40mm, 25mm, 13mm골재, 잔골재, 채움재를 사용하였다. 40mm와 25mm골재는 기층용 혼합물에, 그리고 13mm골재는 표층용 혼합물에 주로 사용하였다. 아스팔트 콘크리트 혼합물에 있어서 결합재인 아스팔트와 더불어 골재의 품질과 입도는 혼합물의 특성에 중요한 영향을 미친다. 이에 골재들을 KS F에 규정된 방법에 따라 품질 시험을

표 2. Properties of asphalt

Classification	AC 60-80	
	Spec.	Measured value
Penetration 25℃ (0.1mm)	60~80	76
Viscosity 60℃ (poise)	1,600~2,400	1,714
Ductility 25℃ (cm)	>100	138
Flash point (℃)	>230	334
Retained penetration after thin-film oven test (%)	>52	59
Ductility after Thin-film oven test (cm)	>50	105
Specific gravity		1.024

표 3. Properties of aggregates

Classification	Spec. limit	Agg. from RAP	40mm agg.	25mm agg.	13mm agg.	Fine agg.	Filler
Specific gravity	>2.45	2.68	2.7	2.73	2.69	2.79	2.75
Absorption (%)	<3.0	1.5	1.2	0.5	1.2	2.2	-
Abrasion (%)	<35	18	-	17	15	-	-

실시하였으며 그 결과는 표 3, 4와 같다. 신규골재뿐 아니라 RAP골재의 품질도 우수한 것으로 나타났다.

2.2 실험방법

2.1.1 RAP의 추출 및 회생

재생아스팔트의 제조에 사용될 RAP에 포함되어 있는 노화 아스팔트에 대한 침입도와 점도를 조사하고 추출된 골재의 입도를 얻기 위하여 KS F 2354에 따라 원심 분리에 의해 아스팔트 및 골재를 추출·분리하였다. 그리고 아스팔트가 용해된 용액으로부터 ASTM D 1856의 Abson recovery 방법을 사용하여 아스팔트를 회생(Recover)하였다.



표 4. Gradation of aggregates

Sieve size	Percent passing (%)					
	40mm agg.	25mm agg.	19mm agg.	13mm agg.	Fine agg.	Filler
25mm	100	100	100	100	100	100
19mm	57.02	93.44	100	100	100	100
13mm	57.02	93.44	100	100	100	100
10mm	5.19	26.55	29.11	89.22	100	100
#4	0.95	0.93	7.22	33.8	80.73	100
#8	0.81	0.59	2.77	16.79	50.76	100
#10	0.81	0.58	2.47	15.56	47.62	100
#30	0.81	0.58	1.64	8.84	25.08	100
#40	0.75	0.58	1.56	7.73	20.44	100
#50	0.75	0.58	1.45	6.88	16.98	99.75
#100	0.6	0.52	1.1	4.68	9.6	86.1
#200	0.41	0.37	0.73	3.77	6.41	82.6

2.2.1.1 혼합물의 역청 함유량

RAP에 포함된 아스팔트 함량은 2가지 방법으로 확인할 수 있다. 하나는 연소 아스팔트 함량 시험기 (Ignition chamber)를 이용하여 혼합물을 태워 그 중량 차이로부터 구하는 방법이고 다른 하나는 혼합물을 용매로 녹여 추출·분리된 골재와 혼합물의 중량 차이로부터 구하는 것이다. 전자가 보다 간단한 방법이나 본 연구에서는 RAP에 포함된 아스팔트의 물리적 성질 확인을 위해 아스팔트의 추출·회생이 필요하므로 후자의 방법을 택했다.

RAP을 110℃의 오븐에서 30분 이하의 시간으로 가열하여 잘게 부수고 Trichloroethylene(TCE) 용매에 1시간 이내로 상온에서 RAP에 포함된 아스팔트를 용해시켰다. 이를 추출용 원심분리기에 넣은 후 3600rpm의 속도로 회전시켜 아스팔트가 용해된 용액을 골재로부터 추출하여 골재와 아스팔트를 분리하여 아스팔트 함량을 구하였다.

2.2.1.2 아스팔트 회수 시험

아스팔트 회수는 ASTM D 1856의 Abson

recovery 방법을 따랐으며, 전 과정은 8시간 이내로 수행되었다. 이 방법의 특징은 추출 용매를 2차 원심 분리기에 넣고 추출시 수반된 filler 등 미네랄 성분을 침전시킨 후 1차 증류과정으로 TCE와 아스팔트가 혼합된 용액의 양을 250ml 이하로 증류하고 2차 증류과정에서는 용액의 온도가 130℃일 때 탄산가스(CO₂) 주입을 시작하여 160℃일 때 탄산가스 주입을 900ml/min로 유지하는 것이다.

2.2.1.3 회수 아스팔트 바인더 시험

수집한 RAP으로부터 얻어진 회수한 아스팔트 바인더에 대하여 침입도와 점도, GPC 분석을 하였다. 침입도 시험은 KS M 2252에 의하여 25℃에서 수행하였다. 각 샘플은 직경 5cm, 깊이 4cm의 알루미늄캔에 넣어서 측정 전 25±0.1℃로 유지된 항온수조에 한시간 동안 넣어 측정하였다. 한편 점도는 절대점도와 동점도를 모두 측정하였으며, 미국의 점도등급(Viscosity grade)에서 쓰이는 절대점도를 ASTM D 2170에 의하여 60℃에서 측정하였다.



2.2.2 재생 아스팔트 바인더 시험

RAP으로부터 추출한 노화된 바인더와 재생 혼합물에서 추출한 재생 아스팔트 바인더의 특성을 비교·분석하기 위하여 침입도 시험, 점도 시험과 함께 GPC 분석을 하였고, 단기 노화 특성을 위하여 박막 가열오븐(TFO : Thin Film Oven)시험을 하였으며, 또한 장기 노화에 따른 저온 특성을 위해 BBR 시험을 수행하였다.

2.2.2.1 GPC 분석

절대점도와 함께 아스팔트의 노화의 특성을 비교 분석하기 위하여 HP-GPC(High-performance gel-permeation chromatography) 분석을 하였다(그림 2). 이는 아스팔트 노화에 따른 분자입도분포에 어떤 변화가 있는지를 측정하는 크로마토그램 분석이다. 아스팔트가 노화되면 아스팔틴(Asphaltene)함량이 증가되며 이는 점도가 증가하고 침입도가 낮아지는 현상으로 나타나며 이를 크로마토그램으로 분석하면 아스팔트 내에 대형분자(Large Molecular Size: LMS)의 증가로 나타난다(그림 3). 따라서 대형분자의 증가 정도와 노화상태는 밀접한 상관관계가 있는 것으로 보고 있다(김광우, 1999). 따라서 GPC 시험결과에 의해 RAP의 노화 상태를 추정하여 노화정도를 평가하였다. 본 연구에서는 추출·회생된 바인더의 LMS뿐만 아니라 추

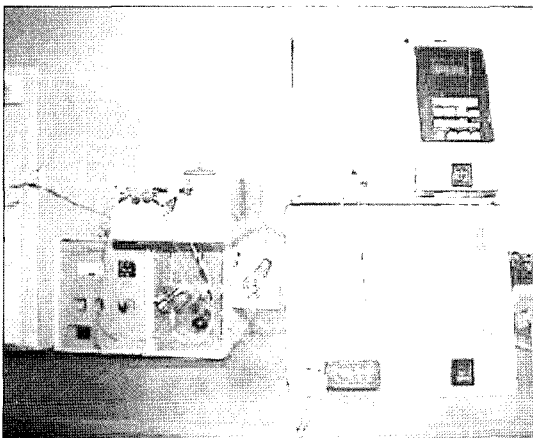


그림 2. HP-GPC tester

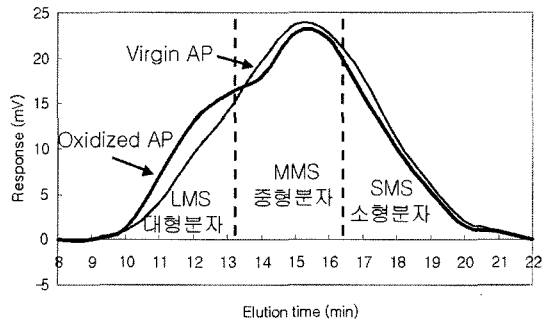


그림 3. Typical GPC profiles of old and new asphalts

출하지 않은 RAP를 Tetrahydrofuran(THF)에 녹여 직접 LMS를 구하기도 하였다. 이를 각각 LMSA, LMSB라 명명하였다.

2.2.2.2 박막가열오븐(TFO : thin film oven)시험

아스팔트 혼합물의 생산 및 시공단계에서 아스팔트의 단기 노화를 모사하기 위한 박막가열오븐 시험은 KS M 2258 규정을 따랐다. 먼저 안지름이 140mm이고 깊이가 9.5mm인 바닥이 편편한 원형 팬에 50g의 아스팔트 시료를 넣었다. 팬에서의 아스팔트 층의 깊이는 약 3mm이다. 아스팔트를 담고 있는 팬은 환풍 시설이 되어있는 163℃의 항온 오븐 속의 선반으로 옮겨졌다. 이 선반은 분당 56회전을 한다. 오븐 속에 시료를 5시간 동안 거치한 후, 노화된 아스팔트의 침입도를 측정하기 위하여 적당한 용기 속에 이 시료를 옮겨 담았다. 이를 통해 노화 전의 아스팔트 침입도와 노화된 아스팔트 침입도를 비교하였다(KS M 2252).

본 연구에서는 AC 60-80에 RAP에서 추출한 아스팔트를 직접 혼합한 바인더와 RAP을 첨가한 재생 혼합물로부터 추출한 혼합물 바인더를 비교하여 실험하였다.

2.2.2.3 BBR (Bending Beam Rheometer)시험

BBR 시험을 하기 위해서 압력노화(PAV : Pressure aging vessel)를 수행하였다. 아스팔트 바



인더의 압력노화는 휘발성 물질의 제한된 감소, 고온에 의하지 않고 산화과정을 가속시키고, 한번에 적당한 양의 아스팔트를 노화시킬 수 있으며, 일상 실내 시험으로 적합한 시험이다.

BBR은 저온균열에 대한 아스팔트 바인더의 물성을 결정하기 위하여 바인더를 매우 낮은 포장온도에서 시험한다. 일정 저온 하에서의 아스팔트 보 (beam)시편에 휨모드의 크리프하중을 가하며, 온도는 에틸렌 글리콜(ethylene glycol), 메타놀(methanol) 및 물로 혼합된 액체가 들어있는 수조에 의해 유지된다. 시편의 모양과 하중재하방법은 ASTM D 790(비강화 또는 강화 플라스틱과 전기 절연 재료의 휨 특성에 대한 시험방법) 시험방법과 매우 흡사하다. BBR은 하중 지지대, 온도조절 수조, 데이터 수집 시스템으로 구성되어 있다(그림 4).

데이터 수집 시스템은 적용하중과 처짐결과를 기록하고, 다음 두 가지 사항을 계산한다. 즉, 크리프 스티프니스(creep stiffness), $S(t)$ 와 m 값이다. $S(t)$ 는 일정한 하중하에서 아스팔트의 저항성을 측정하는 것이고, m 이라고 불리는 수치는 하중이 작용함에 따라 아스팔트 굳기의 변화를 측정하는 것이다.

길이 125mm, 폭 12.7mm 및 두께 6.35mm의 아스팔트 보는 가열된 아스팔트를 알루미늄 몰드에 부어서 제작했다. 시편을 탈형하기 앞서 몰드를 냉동고에 5분에서 10분간 넣어두었으며, 온도평형상태로 만들기 위해서 시편을 시험수조에 60 ± 5 분 동안 담겨둔 후 시험을 실시하였다. 사전 작용하중 단계를 마친 후, 100g의 하중이 240초 동안 아스팔트 보에 재하되었다.

시험을 실시하는 도중에 시간의 변화에 따른 하중 및 처짐의 변화가 컴퓨터 스크린에 나타나며 240초 동안의 재하가 끝난 후, BBR의 소프트웨어는 다음과 같이 크리프 스티프니스와 m -값을 결정하는데 필요한 모든 계산을 완료하였다. 60초간 하중 재하기간 동안의 아스팔트 바인더의 크리프 스티프니스를 구하기 위해서 식 (1)과 같이 종래의 보 (beam) 해석이론이 사용된다(McGrennis et al, 1994).

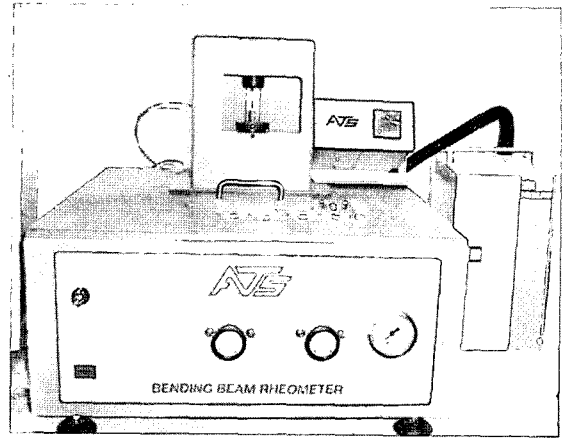


그림 4. Bending beam rheometer

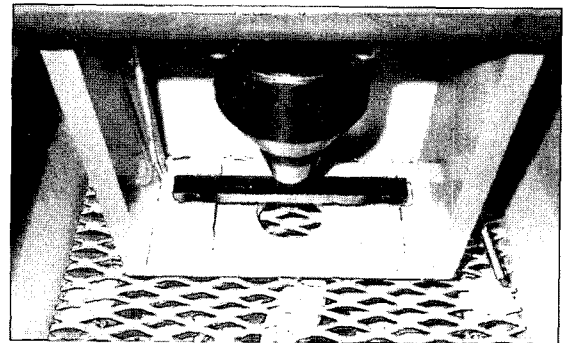


그림 5. Asphalt binder beam and loadcell in BBR chamber

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad (1)$$

여기서,

$S(t)$: $t = 60$ 초에서의 크리프 스티프니스

P : 작용한 하중, 100g (980mN)

L : 보 지지대의 간격(지간), 101.6mm

b : 보의 폭, 12.7mm

h : 보의 두께, 6.35mm

$\delta(t)$: $t = 60$ 초에서의 처짐

BBR시험은 240초간 보에 하중을 가하는 동안 재하시간 8, 15, 30, 60, 120, 240초일 때의 스티프니스 값을 측정한다. 이 재하시간 값은 시간을 대수(log)로 나타내었을 때 간격이 같기 때문에 선정되었



다(Bahea and Anderson, 1994). 측정된 결과를 이용하여 (2)식에서 구하면 아스팔트 바인더의 마스터 스티프니스(크리프 컴플라이언스)곡선을 결정할 수 있다.

$$S(t) = A + B \log(t) + C [\log(t)]^2 \quad (2)$$

여기서,

$S(t)$: 아스팔트 바인더의 스티프니스

t : 시간

A, B, C : 상수값

3. 결과 및 고찰

3.1 RAP의 특성

회수 아스팔트 포장재료를 파쇄한 후 체가름하여 13mm이하 RAP만을 사용하였다. RAP의 다양한 아스팔트 함량과 노화상태별 비교를 철저히 하기 위하여 무작위로 표본을 추출하여 실험하였다. RAP 골재의 비중은 원심분리방법에 의해 추출된 골재로부터 얻어진 굵은 골재, 잔골재, 필러의 비중을 각각 구하여 백분율에 의해 산출하였다.

RAP의 함수비는 폐아스콘의 파쇄 공정과, 작업 기상상황, 야적 상태 등에 따라 차이를 보였으나 재활용을 목적으로 세심한 관리와 보관을 통해서 RAP의 함수비는 관리가 가능하였다. RAP-4의 경우 수집 당시 는 비록 함수비가 5%에 육박하였으나 비를 맞지 않도록 12일 저장 후에 함수비가 $3 \pm 0.5\%$ 로 내려가 다른 RAP과 유사하게 제어가 가능하였다. 그러므로 본 실험에서는 함수비는 일정하게 3%로 보고 별도의 고려는 하지 않았다. 즉, 대기중에 지분이 가려진 상태로 야적된 RAP의 상태는 모두 3% 정도로 유지가 가능하므로 변수에서 제외했다.

3.1.1 추출 · 회수한 바인더 특성

RAP으로부터 추출 · 회수한 바인더를 가지고 침

표 5. Properties of recovered asphalt binder

Classification	Penetration (0.1mm)	Viscosity (poise)	LMSB in GPC (%)
RAP-1	36	7,254	17.83
RAP-2	36	7,293	17.83
RAP-3	24	12,390	18.43
RAP-4	46	5,230	16.59

입도와 절대점도를 시험하였는데, 이를 통해보면 RAP의 노화상태와 아스팔트 함량이 다른 것을 볼 수 있었다(표 5). RAP-3의 경우 바인더의 노화가 가장 심하여 적어도 5년 이상 지난 혼합물인 것 같이 보이며 RAP-4의 경우는 매우 노화가 적게 진행된 혼합물로 보인다.

3.2 재생혼합물의 배합설계

일반적으로 배치플랜트를 사용하여 혼합을 하는 경우에는 RAP을 최대 50%까지 사용할 수 있으나 RAP을 사전 가열하는 보조장치가 없으면 10~35%가 적절한 비율로 보고 있다. 한편 드럼 믹스 플랜트의 경우는 최대 70%까지 사용할 수 있으나 일반적으로 10~50%를 적절한 비율로 제시하고 있다.

본 연구에서는 국내 실정과 부합하도록 배치 플랜트에 RAP의 별도 가열장치가 없는 경우를 적용하였다. 따라서 미국 아스팔트 협회에서 제시하고 있는 최대비율인 50% 이하로써 마살배합설계에서 얻어진 최적아스팔트함량으로 공시체를 제작하여 시험을 수행하였다. 또한 RAP 비율과 RAP 온도에 따라 플랜트 출하온도를 고려하여 실험을 수행하였는데, 최소한의 혼합물 출하온도를 150℃로 정하였으며 이를 만족하기 위해서는 표층용의 경우 10, 20%의 RAP을 첨가하였고, 기층용의 경우 10, 20, 30%를 첨가하여 수행하였다. 첨가할 결합재의 선정은 가장 심하게 노화된 RAP-3를 20% 첨가한 재생혼합물을 가지고 아스팔트 점도 배합 차트를 이용하여 첨가할



표 6. Designation of mixtures

Classification	Designation
D5R0	13mm dense grade control mixture
D5R1-10, 20	13mm dense grade RAP-1 10, 20% added mixture
D5R2-10, 20	13mm dense grade RAP-2 10, 20% added mixture
D5R3-10, 20	13mm dense grade RAP-3 10, 20% added mixture
D5R4-10, 20	13mm dense grade RAP-4 10, 20% added mixture
B5R0	BB-2 control mixture
B5R1-10, 20, 30	BB-2 RAP-1 10, 20, 30% added mixture
B5R2-10, 20, 30	BB-2 RAP-2 10, 20, 30% added mixture
B5R3-10, 20, 30	BB-2 RAP-3 10, 20, 30% added mixture
B5R4-10, 20, 30	BB-2 RAP-4 10, 20, 30% added mixture

Note : BB-2 : 안정처리기층용 BB-2.

아스팔트 점도 등급을 확인한 결과 AC 60-80이 선정되었다.

표 6은 실험에 사용된 혼합물들에 대한 구분과 설명이다. 표에서 보듯이 사용된 혼합물은 총 22가지이며 맨앞이 D로 시작하는 것은 밀입도 표층용, B로 시작하는 것은 기층용 혼합물이다. 기층은 아스팔트 안정처리기층(Black base)으로 선정하였으며, 입도는 BB-2로 하여 수행하였다.

3.3 재생 아스팔트 바인더 특성

재생혼합물의 역학적 특성을 연구하기에 앞서 결합재의 특성을 연구하는 것이 필요하다고 하겠다. 따라서 본 연구에서는 재생 아스팔트 바인더의 GPC 분석을 통해 LMS와 점도와의 관계 및 단기노화와 장기노화에 따른 바인더의 특성과 저온균열 저항성에 대해 연구하였다.

3.3.1 점도 시험

재생혼합물에 첨가될 신규아스팔트의 등급은 RAP에서 추출·회생된 바인더의 점도나 침입도로

부터 결정된다. 침입도는 비록 간편하게 얻을 수 있는 값이기는 하나 지수가 가지는 광범위한 변동성 때문에 정확도가 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 미국 Asphalt Institute (AI)의 점도에 의한 방법으로 첨가할 아스팔트의 등급을 결정하였다. 표 7은 RAP을 신규재료와 혼합한 재생 아스팔트 바인더의 절대점도를 보여주는 것이다. 이를 통해 본 연구에서는 가장 심하게 노화된 RAP-3를 20% 첨가(표층용)하였음에도 절대점도가 비교적 낮게 나와 국내에서 주로 사용하는 AC 60-80을 기본 바인더로 사용하였다.

표 7. Absolute viscosity of recycled asphalt binders

Classification \ RAP content(%)	RAP content(%)		
	10	20	30
RAP-1	2,372ps	2,654ps	3,296ps
RAP-2	2,459ps	2,815ps	3,320ps
RAP-3	2,833ps	3,436ps	4,014ps
RAP-4	2,298ps	2,539ps	2,967ps
Control	2,245ps		



3.3.2 GPC 분석

GPC 분석을 통해서 LMS와 점도와의 관계를 알아보려고 하였는데, 그림 6은 두 가지 GPC 방법으로 구한 혼합물(RAP)별, 함량별로 대형분자량(Large Molecular Size: LMS)을 보여준다. 그림에서 LMSA는 GPC 샘플을 RAP에서 회생(recover)한 바인더를 Tetrahydrofuran(THF)에 녹인 용액에서 채취하여 측정된 것이고 LMSB는 RAP 혼합물을 바로 THF에 녹인 용액에서 샘플로 채취하여 측정된 것이다. 전체 13 혼합물 중에서 4개의 경우를 제외하고는 LMSA가 다소 큰 값을 보여준다 거의 비슷하다. 모든 RAP 함량 100%(100)의 LMS 값들이 RAP 함량 10%나 20%(10, 20)보다 월등히 높은 것을 알 수 있어 RAP 자체는 노화가 많이 되었는데 이를 신규 아스팔트와 섞음으로서 노화 정도가 그림 맨 왼쪽의 VIR(Virgin)으로 나타낸 신규 아스팔트 AC 60-80과 거의 비슷한 수준이 된

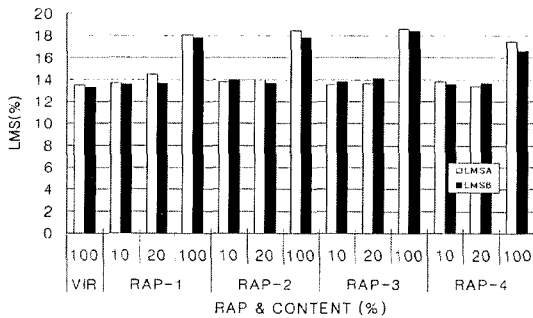


그림 6. LMS values measured from recovered binder (LMSA) and directly from RAP (LMSB)

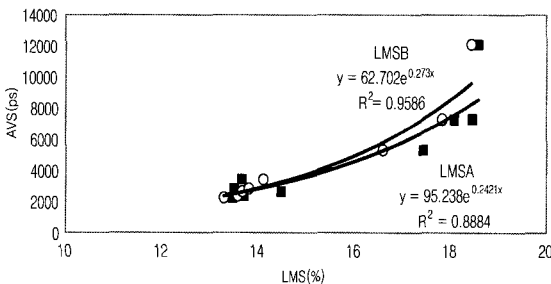


그림 7. Relation of absolute viscosity with LMS of GPC samples from recovered asphalt (LMSA) and RAP (LMSB)

것을 알 수 있다. 즉, 노화된 아스팔트가 신규 아스팔트와 일정비율 섞임으로써 상당히 많이 회생된다는 것을 LMS 를 통해서 알 수 있음을 보여준다.

그림 7은 본 연구에 사용된 RAP과 그 RAP을 그림 6과 같이 함량별로 조정하여 제조한 재생 혼합물로부터 LMSA 및 LMSB를 구한 값을 x축에, 각 혼합물 중에서 절대점도를 측정된 자료(표 5와 7)를 y축에 그린 그림이다. 그림의 두 곡선은 각각 점도를 종속변수로 하고 LMSA 또는 LMSB를 독립변수로 하여 지수함수 회귀분석(Exponential regression)을 수행한 것이다.

두 가지 경우 모두 R²이 0.88 이상으로 상당히 높은 상관관계를 보였는데 그 중 LMSB의 결정계수(R²)가 더 높게 나타났다. 이는 LMSB에 의한 절대점도(AVS)의 추정이 더 정확함을 의미하는 것이다. 더구나 이때의 R²이 0.95 이상이어서 매우 실제 점도와 근사한 추정이 가능하다고 판단된다. 이것은 기존의 연구(Kim 등 2003)에서 얻어진 결과와 유사하였다.

3.3.3 TFO 시험

본 연구에서는 AC 60-80에 RAP에서 추출한 아스팔트를 직접 혼합한 바인더(pen. ratio, ②/①)와 RAP을 첨가한 재생혼합물로부터 추출한 혼합물 바인더(pen. ratio, ④/③)의 침입도비를 비교하였다. 바인더를 TFO 시험한 후의 침입도(②)와 재생혼합물을 추출·회생한 아스팔트의 침입도(③)가 유사하여 TFO 시험을 통해 바인더의 단기 노화 모사가 가능함을 알 수 있었다(표 8).

AC 60-80의 침입도비는 ASTM D 1745(KS M 2258)에서 55%이상으로 규정되어 있는데 ②/①)와 ④/③) 모두 만족된 값을 보였으며, Mixture의 경우는 아스팔트가 이미 추출·회생 과정을 거치면서 노화되어 침입도비(④/③)가 높음을 알 수 있었다.

3.3.4 BBR 시험

BBR은 재생혼합물의 저온균열에 대한 저항성을

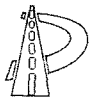


표 8. Results of TFO test

Classification	(AC 60-80) + recovered binder from RAP			Binder recovered from the mix of (AC 60-80) + virgin agg. + RAP		
	Pen. (before TFO) ① (0.1mm)	Pen. (after TFO) ② (0.1mm)	Pen. ratio (②/①) (%)	Pen. (before TFO) ③ (0.1mm)	Pen. (after TFO) ④ (0.1mm)	Pen. ratio (④/③) (%)
AC 60-80	76	48	63	50	38	76
RAP1-10	71	42	59	44	36	82
RAP1-20	69	41	59	41	34	83
RAP1-30	65	39	60	40	33	83
RAP2-10	72	42	58	43	35	81
RAP2-20	68	41	60	41	35	85
RAP2-30	63	39	62	38	32	84
RAP3-10	70	39	56	35	30	86
RAP3-20	62	38	61	34	29	85
RAP3-30	57	38	67	32	26	81
RAP4-10	74	44	59	48	38	79
RAP4-20	72	42	58	45	37	82
RAP4-30	69	41	59	41	35	85

표 9. Results of BBR test

Prop. / Classification	Temperature (°C)	Deflection (mm)	Stiffness (Mpa)	m-value
Control	0	2.0471	38.713	0.4124
	-6	0.8943	88.089	0.3385
	-12	0.4150	189.204	0.3008
RAP1-20	0	2.0603	38.583	0.4143
	-6	0.9001	87.762	0.3407
	-12	0.3343	234.808	0.2761
RAP1-30	0	1.5374	51.591	0.3657
	-6	0.7317	107.810	0.3008
	-12	0.3512	224.703	0.2558
RAP2-20	0	1.2395	64.068	0.3457
	-6	0.7526	104.895	0.3108
	-12	0.4142	193.351	0.2851
RAP2-30	0	1.1895	66.761	0.3394
	-6	0.6733	117.790	0.3172
	-12	0.3526	223.614	0.2727

표 9. Results of BBR test (계속)

Prop. Classification	Temperature (°C)	Deflection (mm)	Stiffness (Mpa)	m-value
RAP3-20	0	1.8202	43.467	0.3775
	-6	0.7353	108.021	0.3169
	-12	0.2916	270.526	0.2570
RAP3-30	0	1.2985	61.051	0.3615
	-6	0.6465	122.086	0.3217
	-12	0.3181	247.7236	0.2594
RAP4-20	0	1.4108	56.195	0.3616
	-6	0.6714	117.945	0.3198
	-12	0.3705	213.011	0.2714
RAP4-30	0	1.2225	64.864	0.3452
	-6	0.5440	145.808	0.2980
	-12	0.3584	220.982	0.2932

모사하기 위한 시험으로 단기노화와 장기노화를 거친 재생 아스팔트 바인더의 강성(Stiffness)을 저온에서 측정하였으며, 그 결과를 표 9에 나타내었다. 수퍼페이브 바인더 시방은 60초간 재하시간에서의 S(t)의 최대 허용값과 m값의 최소 허용값을 규정하고 있다. 이 두 요소의 제한값은 각각 $S(60) \leq 300\text{MPa}$, $m \geq 0.300$ 이다. m값이 커질수록, 강성이 작을수록 저온균열 저항성이 강하다고 할 수 있다.

표 10에서 알 수 있듯이 Control 바인더보다 재생 바인더의 강성이 높음을 알 수 있다. 즉, RAP을 첨가한 재생 아스팔트 바인더의 저온 등급은 일반 신규

바인더에 비해 한 단계 높은 등급을 나타내어 저온균열에 대한 저항성은 약간 약한 것으로 나타났다. 이는 기존의 연구 결과(이영관, 2003)와 같이 재생혼합물의 높은 강성지수(Stiffness index)와 같은 결과로 사료된다. 즉, 현장에서 노화된 RAP은 혼합물내의 강성증가의 원인이 되며, 이런 RAP을 첨가한 재생혼합물의 바인더 역시 강성이 증가하여 저온균열에 대한 저항성이 약하게 되는 것이다.

본 시험을 통하여 신규 바인더(Control)와 재생 아스팔트 바인더의 PG 저온 등급을 표 10에 나타내었다. PG 저온등급은 규정된 두 허용값을 만족하는 시험온도에 -10을 해준 것으로 결정된다.

재생바인더의 저온균열 저항성을 향상시킬 방안으로 개질재의 첨가를 생각할 수 있으나 김광우 등(2000)에 의하면 개질재의 첨가로 고온등급은 향상시킬 수 있으나 저온등급에는 개질효과가 없는 것으로 나타났다. 따라서 가장 적합한 개선책으로는 신규 바인더의 선택을 신중히 함으로써 새로 첨가하는 바인더의 점도를 한 단계 낮추어 사용하는 것이다. 그러므로 재생혼합물 제조시에는 신규바인더로 AC 80-100 사용하는 것이 보다 적합할 것으로 사료된다.

표 10. PG of recycled asphalt binders

Mixing content (%) Classification	20	30
Control	-22	
RAP-1	-16	-16
RAP-2	-16	-16
RAP-3	-16	-16
RAP-4	-16	-10

4. 결 론

본 논문은 국내에서 대량으로 발생하는 폐아스팔트 포장재료를 상온의 RAP상태로 가열재생하여 기층용뿐만 아니라 표층용으로 활용하기 위한 재생 아스팔트 바인더의 특성을 연구한 것이다. 4종류의 RAP을 가지고 RAP 자체의 기본 물성과 RAP에서 추출·회생한 바인더 특성, RAP을 첨가한 재생 아스팔트 바인더로부터 각종 시험을 수행하였으며 이로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 재생혼합물에 첨가할 바인더를 결정하기 위해 AC 60-80과 RAP-1(점도 7,254ps), RAP-3(점도 12,390ps)를 20% 첨가한 재생혼합물의 절대점도를 측정 한 결과 2,654ps와 3,436ps가 나왔다. RAP-3를 혼합한 경우(3,436ps) 다소 점도가 높았으나 RAP-1이나 RAP-4와 혼합한 경우는 2,500~2600ps가 나와 AC 60~80만을 TFO 처리한 것(2,245ps)과 큰차이가 없으므로 RAP이 심하게 노화된 경우가 아니면 AC 60-80을 사용하는 것도 가능성이 있는 것으로 판단되었다.
- 2) 노화된 아스팔트가 신규 아스팔트와 일정 비율 섞임으로써 AC 60-80과 거의 비슷한 수준으로 회생된다는 것을 GPC 분석을 통해서 알 수 있었다. 또한 절대점도와 대형입도분자(LMS)를 지수함수 회귀분석을 수행한 결과, R^2 이 0.95 이상으로 절대점도 추정에 상당히 정확함을 보여주었다. 이를 통해 노화 아스팔트 혼합물의 GPC 실험으로 점도 상태를 간단히 구할 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) 바인더를 TFO 시험한 후의 침입도와 재생혼합물을 추출·회생한 아스팔트의 침입도가 유사하여 TFO 시험을 통한 단기 노화 모사가 가능함을 알 수 있었다. 침입도비는 55% 이상으로 규정되어 있는데 Binder와 Mixture 모두 만족된 값을 보였으며, Mixture의 경우는 아스팔트가 이미 추출·회생 과정을 거치면서 노화되어 침입도비가 높음을 알 수 있었다.
- 4) 재생혼합물 추출 바인더의 BBR 시험 결과 RAP을 첨가한 재생 아스팔트 바인더의 PG 저온 등급은 일반 신규 바인더에 비해 한 단계 높은 등급을 나타내어 저온균열에 대한 저항성은 약간 약한 것으로 나타났다. 이 결과로 볼 때 앞에서 AC60-80의 사용도 어느 정도 무방해 보였으나 저온특성을 고려한다면 새로 첨가할 바인더의 선택에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김광우, 이성훈, 도영수 (2000), "아스팔트 콘크리트의 역학적 특성과 결합재 성능과의 관계 구명," 연구보고서 제 5집, 석재복합신소재제품연구센터, 강원대학교.
2. 이영관 (2003), "상온 RAP첨가 재생아스팔트 혼합물의 바인더 특성 연구," 강원대학교 대학원 석사학위논문.
3. "2000년 전국 폐기물 발생 및 처리현황," (2001). 환경부.
4. Anderson, D. A. and T. W. Kennedy. (1993), "Development of SHRP Binder Specification," *Proc. AAPT, Vol. 62*.
5. ARTS Quarterly (2001), Asphalt Rubber Technology Service, Clemson University, *Clemson, SC. Vol.1, No.2 P.1*
6. Kim, K. W. and Ahn, K. A. (2003), "Direct estimation of LMS from solution of RAP," *the Paper submitted to ASCE Journal of Materials in Civil Engineering for possible publication*.
7. Bahea, H. R. and Anderson, D. A. (1994), "The Pressure Aging Vessel(PAV): A Test to Simulate Rheological Changes Due to Field Aging," ASTM Special Technical Publication 1241.
8. Mcgennis, R. B., S. Shulwe, and H. U. Bahia. "Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods," *FHWA, Report No. FHWA-SA-94-069*.
(접수 : 2004. 3. 22)