

페타이어를 사용한 아스팔트 포장재료의 노화 특성연구

Aging characteristics of CRM Modifid Asphalte Concrete Mixture



이 석 흥*

1. 서론

아스팔트 포장도로의 품질을 증진시키려는 여러 가지 노력 중에 하나로 아스팔트 시멘트를 보다 나은 성질의 것으로 대처하려는 방법이 꾸준히 발전되어 왔다. 이러한 연구 노력의 일환으로 최근 환경적인 이유로부터 시작된 페타이어를 분쇄한 고무가루 (Crumb Rubber Modifier, CRM) 를 사용하여 아스팔트 시멘트의 공학적인 성질을 증진시키는 방법이나 또는 아스팔트 혼합물에 사용되는 골재의 일부를 CRM으로 치환시키는 방법이 광범위하게 연구되어지고 있다. 본 연구에서는 특히 CRM을 포함한 아스팔트 혼합물과 일반 아스팔트 혼합물의 노화현상에 관한 물성 비교를 실험적으로 수행하였다.

표 1 에서는 본 연구과제를 수행하는데 필요한 시험의 종류들을 요약 하였으며, 이번 연구논문에서는

표 1 본 연구과제를 위해 수행된 실험의 종류들

아스팔트 바인더	<ul style="list-style-type: none"> - Swelling Test - 점도시험 (Brookfield Viscometer Test) - 단커 노화시험 (Thin Film Oven Test) - Dynamic Shear Rheometer(DSR)Test
아스팔트 혼합물 배합설계	<ul style="list-style-type: none"> - 아상배합시험 - Wet Process (습식방법) <ul style="list-style-type: none"> - 밀입도 (AC-20) - 밀입도 (Asphalt-Rubber) - gap-graded (Asphalt-Rubber) - 밀입도 (Drymix) - Dry Process (건식방법) <ul style="list-style-type: none"> - 밀입도 (C/MAC) - gap-graded R/C/MAC
혼합물 특성시험	<ul style="list-style-type: none"> - 진압인장강도시험 <ul style="list-style-type: none"> * unaged, short/long term aged - 회복탄성계수시험 <ul style="list-style-type: none"> * Unaged * unaged, short/long-term aged

* 현대건설 기술연구소 책임연구원

본 연구과제의 결과중에서 CRM을 사용한 고무 아스팔트(asphalt-rubber)와 그를 사용한 가열아스팔트 혼합물 (wet and dry process)의 노화현상에 대한 결론만을 소개하도록 하였다.

아스팔트 시멘트의 노화현상은 최근 들어 여러 연구기관으로부터 주목을 받고있는 중요 연구분야이다. 아스팔트 시멘트의 단기노화현상 (short-term aging)은 주로 아스팔트 콘크리트 혼합물을 포설하는 동안에 아스팔트 시멘트의 휘발성분의 증발과 산화현상에 의한다고 사료되며, 장기노화현상 (long-term aging)은 이미 포설된 혼합물이 시간에 따라 점진적으로 산화되어지는 연속적인 과정이라고 믿어진다. 일반적으로 이런 노화현상의 결과로 혼합물은 단단하여져서 교통하중의 분포에 대한 지지력이나 소성변형 (rutting or plastic deformation)의 관점에서 보면 오히려 도움이 되기도 하지만 균열, 습기 그리고 마모현상에 대한 저항력을 약화시켜서 결과적으로는 아스팔트 콘크리트의 내구성을 저하시키는 주요한 원인이 된다.

이러한 일반 아스팔트 콘크리트 도로의 전반적인 노화현상에 대하여는 그 동안 상대적으로 많은 연구가 있어왔지만, 이번 연구의 재료가 되고 있는 페타이어를 분쇄한 고무가루를 배합에 이용한 경우에 대해서는 국제적으로도 연구가 전무한 상태이다.

더욱이 CRM을 사용한 고무아스팔트 (unaged, short-term aged)에 대하여 Brookfield 점도계와 DSR을 이용한 유변학적인 고찰은, 미국 SHRP (Superior Highway Research Program)의 아스팔트 바인더 실험을 국내의 실정에 맞게 실용화하는데 있어서 의미 있는 일이라 사료되는 바이다.

특히 본 연구에서는 습식 및 건식배합법에 의한 혼합물의 간접인장강도와 회복탄성계수를 노화단계별 (노화없음, 단기노화, 장기노화)로 측정하여 비교하였으며, 또한 노화되지 않은 asphalt-rubber와 단기노화된 asphalt-rubber의 점도, complex shear modulus, 그리고 phase angle이 소개되어있다. 노화현상에 의한 결과는 각 특성에 대하여 단기노화된 바인더와 노화되지 않은 바인더 간의 비율로 표시되었으며 asphalt-rubber와 일반 아스팔트 시멘트에 대한 노화현상의 결과는 이 뒷부분에 소개되어있

다.

2. 연구 목적

본 연구의 주요내용들은 아래와 같다.

◆ Brookfield 점도계 및 DSR 실험에서 얻어진 asphalt-rubber 들의 점도를 이용한 단기노화현상의 효과에 대한 연구

◆ 습식 및 건식 방법으로 배합된 아스팔트 혼합물의 단기 및 장기 노화거동의 효과에 대한 연구

◆ CRM을 사용한 고무아스팔트의 유변학적 특성과 그를 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 노화거동을 단계별로 규명하기 위한 연구

3. 사용재료

- 아스팔트 : AC-5, AC-10, AC-20 및 캐나다 BITUMAR Inc. 의 ECOFLEX
- 골재 : 분쇄된 석회석
- CRM : 이번 연구에 사용된 대부분의 CRM은 미국 Baker Rubber Inc. 에서 생산된 것으로 입도분포에 따라 WRF1/4" 와 WRF10(No. 10체 통과) 그리고 WRF30 (No. 30체 통과)으로 나뉘며, 아주 고운 입자의 CRM은 미국의 Goodyear Tire Rubber Co.의 것을 사용했다.

표 2 습식방법의 배합에 사용된 골재의 입도분포 및 FHWA의 입도규정체 크기

체 크기	FHWA 밀입도	밀입도 JMF	Max. Density	FHWA Gap-graded	Gap-graded FHWA
1/2"	100	100	100	100	100
3/8"	90-100	90	87.9	78-92	86
No. 4	60-80	60	64.2	28-42	36
No. 8	40-60	40	46.9	15-25	22
No. 16	-	28	34.3	-	15
No. 30	18-30	18	25.4	5-15	10
No. 50	8-18	8	18.5	-	8
No. 200	2-8	2	9.9	3-7	5

표 3 건식방법의 배합에 사용된 골재 및 CRM의 입도분포

체 크기	Gap-graded JMF	CRM	밀위도 JMF
1/2"	100	-	100
3/8"	90	-	90
No. 4	52	100	60
No. 8	30	85	40
No. 16	23	52	28
No. 30	-	27	-
No. 50	7	10	8
No. 200	2	-	2

표 4 각 CRM 입도분포와 규정입도

체 크기	입도, 통과백분율(%)				
	WRF10	WRF30	Goodyer	밀위도	Gap-graded
No. 10	100	100	100	100	100
No. 16	76.3	100	100	98-100	75-100
No. 30	22.9	95.72	98.6	70-100	25-60
No. 50	5.2	18.26	59.2	10-40	0-20
No. 200	0.3	1	1.6	0-5	0-5

표 2에서는 습식방법의 배합에 사용된 골재의 입도분포 및 미국 Federal Highway Administration (FHWA)의 규정을 보여주고 있으며 표 3에서는 건식방법의 배합에 사용된 골재 및 CRM의 입도분포를 보여주고 있다.

4. Asphalt-Rubber 바인더 실험

본 연구에서는 고온에서 (191°C) 아스팔트와 CRM과의 반응현상(reaction)을 관찰하기 위하여 기본아스팔트 (straight asphalt)인 AC-5, AC-10과 그리고 위에서 언급한 3가지의 CRM들을 다른 비율로 혼합한 총 18 종류의 asphalt-rubber를 생산하였다.

CRM을 사용고무아스팔트의 제작방법은 아래와 같다.

- 1) 아스팔트와 CRM을 각각 191°C 까지 가열한다.
- 2) 두 성분을 191°C 에서 적정량 혼합하여 2시간 동안 오븐에서 반응시킨다.
- 3) 반응이 완료된 후 잘 혼합된 소량의 asphalt-rubber 시료를 175°C 로 set-up된 Brook-

field 점도계의 Thermosel 장치에 삽입한다.

- 4) 점도의 크기에 따라 RV3나 RV4 spindle을 장착한 Brookfield DV-II 점도계를 이용하여 12RPM 일 때의 점도를 175°C 에서 측정한다.

표 5는 기본 아스팔트 및 CRM의 종류 및 사용량에 따른, 175°C에서 측정된 asphalt-rubber들의 점도를 표시한다.

표 5 Asphalt-Rubber들의 점도 (cp)

CRM의 종류	CRM content, %	AC-5	AC-10
WRF 10	10	75	275
	15	367	550
	20	2100	1850
WRF 30	10	167	483
	15	2050	1408
	20	3200	4000
Goodyear Ultra Fine	10	167	400
	15	1930	2116
	20	4056	6500

위의 표에서 볼 수 있듯이, asphalt-rubber의 점도는 CRM 첨가량이 많을수록 또 보다 고온 CRM을 사용할수록 증가하는 것으로 나타났다.

그림 1과 2는 각기 다른 입자크기의 CRM을 사용한 고무아스팔트의 점도증가 형태를 보여주고 있다. 특히 그림 1에 사용된 보다 고온 CRM (WRF30)은 그림 2에서 사용된 약간 굵은 CRM (WRF10)보다 훨씬 빠른 반응속도를 보여 반응속도 약 1시간 이내에 최고 점도를 보여주며 그 이후에 대체로 일정한 점도를 유지하고 있다. 이에 반하여 그림 2에서는 거의 전구간의 반응시간을 통해서 점진적으로 점도가 증가하는 그림 1과는 상이한 반응 형태를 보았음을 알 수 있다.

그림 3은 5%, 10%, 15%, 20%, 그리고 25%의 WRF 10을 각각 AC-10 아스팔트 시멘트와 혼합하여 만든 5가지의 asphalt-rubber들에 관하여 24시간동안의 점도증가를 관찰한 그림인데, CRM의 첨가량증가로 인한 반응시간의 증가가 점도증가에 커다란 영향을 주고 있음을 보여주고 있다.

그림 4는 asphalt-rubber의 점도변화와 온도와의 관계를 보여주는 중요한 데이터로 191°C 로 2시간 반응한 후 93.3°C와 121.1°C 그리고 148.9°C에서 측정된 점도를 보여 주고 있다. 이 그림은 위의 측

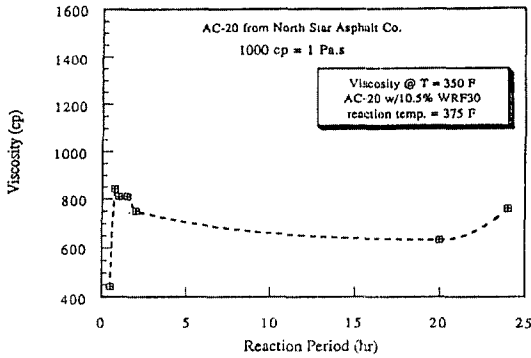


그림 1 가는 CRM(WRF 30)의 점도와 반응시간과의 관계 (191°C)

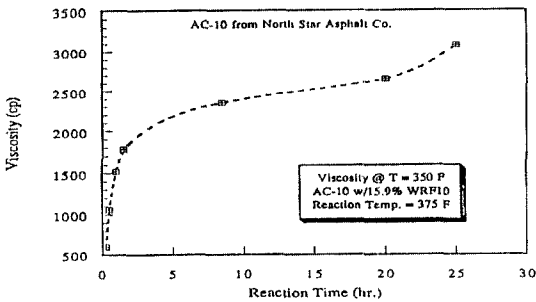


그림 2 굵은 CRM(WRF 10)의 점도와 반응시간과의 관계 (191°C)

정온도 범위 안에서의 온도변화에 따른 점도의 변화량을 보여주고 있는데, 위의 그림에서 볼 수 있듯이 AC-5와 AC-10 그리고 Ecoflex(점선으로 표시되어 있음)의 점도변화량의 온도에 대한 기울기가 다른 CRM을 사용한 러버 아스팔트들 보다 현저히 큼을 볼 수 있다.

본 연구에서 사용된 바인더들의 단기노화 방법은 ASTM D 1754에 규정된 박막가열 오븐법(Thin Film Oven Test)을 이용했으며, 박막가열 오븐 실험 전과 후에 점도 및 시료의 중량변화를 조사하였으

표 6 박막가열오븐 전.후의 점도 및 점도변화의 비율

바인더 종류	점도 (cp) TFOT이전	점도 (cp) TFOT이후	비율
AC-5	260	333	1.28
AC-10	375	604.2	1.61
AC-20	525	845	1.61
AC-10/10% WRF10	1150	1812	1.58
AC-10/15% WRF10	2100	4900	2.33
AC-10/20% WRF10	3200	8000	2.69
AC-5/15% WRF10	2874	4742	1.65
Ecoflex	880	1900	2.16

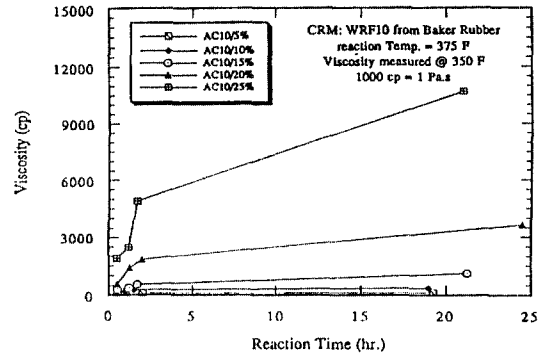


그림 3 Asphalt-Rubber(AC-10 사용)의 점도와 반응시간과의 관계(191°C)

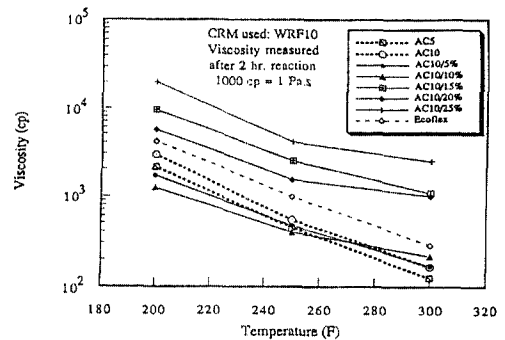


그림 4 본 실험에 사용된 아스팔트 바인더들의 온도와 점도와의 관계

며 점도 및 점도증가비율의 결과는 표 6에 시료의 중량변화는 표 7에 각각 정리되어 있다.

위의 표에서 알 수 있듯이, asphalt-rubber들의 점도증가 비율(박막가열오븐시험 후) 이 일반 아스팔트보다 일반적으로 높게 나타났으며, 특히 CRM 첨가량이 클수록 점도증가 비율도 큰 것으로 나타났다. 박막가열오븐 실험의 결과인 시료의 중량변화율은 표 7에 정리되어 있으며, CRM을 사용한 고무 아스팔트의 중량변화율이 일반 아스팔트보다 우수한 것으로 나타났다.

표 7 박막가열오븐실험에 의한 중량 감소율

바인더 종류	시료의 중량(g) TFOT이전	시료의 중량(g) TFOT이후	중량감소비율, %
AC-10	51.489	51.423	0.128
Ecoflex	50.862	50.761	0.2
AC-10/10%WRF10	53.151	53.104	0.088
AC-10/15%WRF10	50.791	50.782	0.0178
AC-10/25%WRF10	52.123	52.102	0.04
AC-10/15%Goodyear	50.726	52.725	0.0
AC-5/15%WRF30	53.711	53.708	0.005

Dynamic Shear Rheometer 실험

Dynamic Shear Rheometer(DSR) 실험(AASHTO TP 5)은 아스팔트 바인더의 complex shear modulus(G^*)와 phase angle (δ)을 구하는 실험으로 일반적으로 아스팔트의 온도가 5°C와 85°C 사이일 때 나타나는 100Pa에서 10MPa 정도의 G^* 를 측정할 때 쓰이는 장비이다. 이 실험방법은 미국의 SUPERPAVE(Superior Performing Asphalt Pavements) 규정에서 요구되어지는 아스

팔트 바인더의 점탄성적인 성질을 규명하기 위한 실험방법이다. Complex shear modulus(G^*)는 아스팔트 바인더에 작용하는 전단응력(τ_{max})의 최고치와 전단변형률(γ_{max})의 최고치의 비율로서 반복적으로 작용하는 진단변형에 대한 총 저항력이며, phase angle (δ)은 아스팔트 바인더에 작용하는 응력과 그 결과로 나타나는 변형률과의 시간차이로 탄성변형과 잔류변형의 상대적인 양으로 정의할 수 있다. 완벽한 탄성체의 경우에는 하중의 작용과 동시에 변형이 발

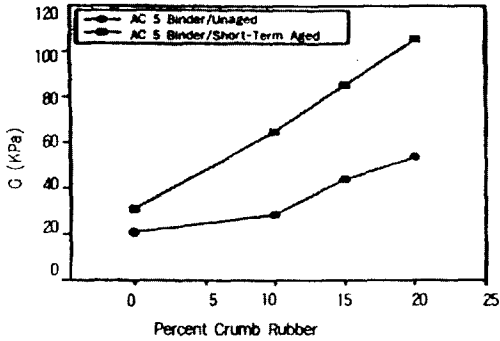


그림 5(a) G'와 CRM혼입량과의 관계(40°C)

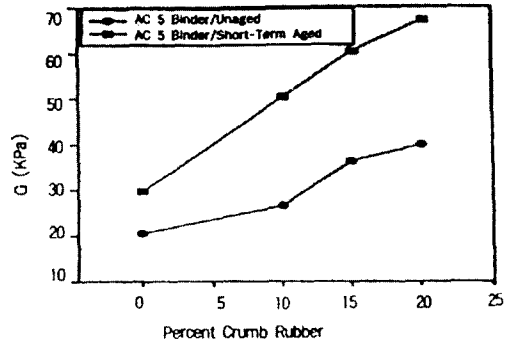


그림 6(a) G''와 CRM혼입량과의 관계(40°C)

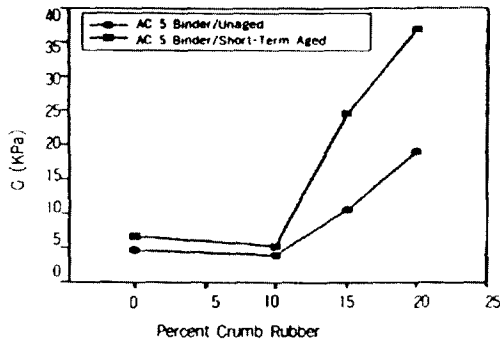


그림 5(b) G'와 CRM혼입량과의 관계(50°C)

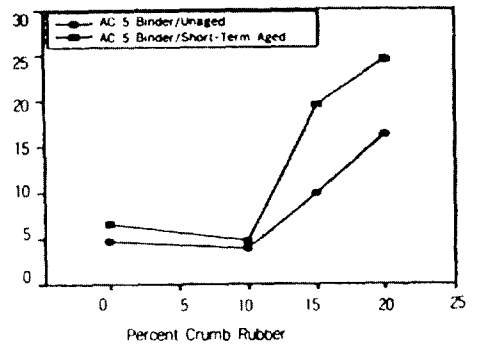


그림 6(b) G''와 CRM혼입량과의 관계(50°C)

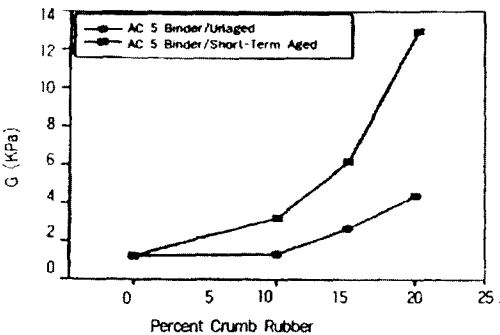


그림 5(c) G'와 CRM혼입량과의 관계(60°C)

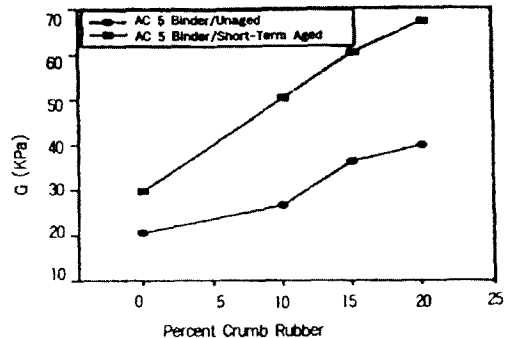


그림 6(c) G''와 CRM혼입량과의 관계(60°C)

생하므로 $\delta=0^\circ$ 이고 아스팔트와 같은 점성물질은 비교적 $\delta=90^\circ$ 에 가까운 큰 값을 갖게된다.

본 연구에서 사용된 DSR 실험에서는 1rad/sec에서 100rad/sec까지의 frequency 범위를 logarithmic frequency sweep 방법으로 실행했으며 실험온도는 40°C와 50°C 그리고 60°C이었다. 이 실험에서 사용된 전단응력은 unaged 바인더인 경우에는 120Pa 이었으며 단기 노화된 바인더인 경우에는 220Pa 그리고 CRM을 사용한 고무아스팔트인 경우에는 5kPa를 사용하였다. CRM이 사용되지 않은 일반 아스팔트의 DSR 실험결과를 표 8에 또 CRM을 사용한 고무 아스팔트의 DSR 실험결과는 표 9에 각각 정리되어있다. 위의 두 표에서 주목할 점은 첫째 CRM의 첨가량 G*값을 증가시킨다는 것과 CRM의 첨가량이 많을수록 G*값이 증가한다는 점이다. 단기 노화된 바인더의 G*값은 CRM의 유분과 상관없이 노화되지 않은 바인더 보다 높은 값을 나타내고 있는데 특히 40°C와 50°C에서 asphalt-rubber의 G*값의 증가량은 60°C에서 증가량 보다 아주 높은 값을 보여주고 있다.

G*값의 탄성 성분인 dynamic storage modulus(G')값과 CRM 첨가량과의 관계가 그림 5(a)와 5(b) 그리고 5(c)에 정리되어있으며 G* 값의 점성 성분인 dynamic loss modulus (G'')값과

표 8 CRM을 사용하지 않은 일반 아스팔트의 DSR 실험결과

Asphalt	G'	G''	G'/G''	δ	
AC10F40	0.153	20.513	20.956	23.473	81.28
AC10SA40	121	30.383	31.637	23.701	78.01
AC10F50	0.085	1.687	1.701	4.67	85.12
AC10SA50	0.121	6.66	6.688	6.554	83.12
AC10F60	0.0002	1.219	1.219	1.219	89.99
AC10SA60	0.016	1.27	1.257	2.57	89.1
AC10F40	0.178	32.219	32.537	31.738	79.89
AC10SA40	0.283	39.111	61.729	57.242	74.36
AC10F50	0.099	6.474	6.505	6.443	84.37
AC10SA50	0.181	8.32	8.557	8.258	79.73
AC10F60	0.019	1.719	1.719	1.719	88.91
AC10SA60	0.088	3.257	3.24	3.215	84.96
AC20F40	0.212	49.942	51.054	48.54	78.02
AC20SA40	0.288	91.85	95.579	88.27	73.95
AC20F50	0.14	12.134	12.252	12.017	82.03
AC20SA50	0.2	19.276	19.66	18.9	78.66
AC20F60	0.067	3.219	3.226	3.222	86.19
AC20SA60	0.112	4.752	4.782	4.723	83.63

표 9 CRM을 사용한 러버 아스팔트의 DSR 실험결과

Asphalt	G'	G''	G'/G''	δ	
AC5-10RRC140	0.272	27.529	28.553	23.542	74.61
AC5-10RCSA50	0.536	57.041	64.7	50.271	61.8
AC5-10RRC150	0.077	3.921	3.933	3.909	85.58
AC5-10RCSA50	0.825	4.992	5.25	4.747	71.97
AC5-10RRC160	0	34	1.34	1.34	90.75
AC5-10RCSA60	0.14	3.193	3.227	3.165	82.33
AC5-15RRC140	0.457	40.014	43.901	36.397	65.45
AC5-15RCSA40	0.647	71.775	83.311	60.233	57.25
AC5-15RRC150	0.265	10.221	16.573	9.881	75.18
AC5-15RCSA50	0.51	21.83	24.523	19.468	62.39
AC5-15RRC160	0.111	9.91	2.967	2.93	83.69
AC5-15RCSA60	0.288	5.948	6.191	5.715	73.97
AC5-20RRC140	0.59	46.258	53.709	39.841	59.46
AC5-20RCSA40	0.755	84.197	105.32	67.181	52.93
AC5-20RRC150	0.411	7.516	18.939	16.2	67.65
AC5-20RCSA50	0.711	30.031	36.839	23.172	54.57
AC5-20RRC160	0.221	3.29	4.731	3.189	77.52
AC5-20RCSA60	0.32	11.488	12.948	10.193	62.53
Ecolflex140	0.421	53.002	58.583	49.759	67.16
Ecolflex140	0.541	89.476	101.73	78.7	61.59
Ecolflex150	0.358	14.33	15.231	13.671	71.34
Ecolflex150	0.444	27.288	29.836	24.939	66.05
Ecolflex160	0.248	4.356	4.146	4.119	76.1
Ecolflex160	0.317	7.62	8.045	7.148	70.86

CRM 첨가량과의 관계는 그림 6(a)와 6(b) 그리고 6(c)에 정리되어있다. 위의 그림들에서 볼 수 있듯이 바인더의 노화현상은 G'이나 G''모두를 증가시키나 특히 40°C에서 증가량은 60°C에서의 증가량을 훨씬 능가하는 것으로 나타났다.

표 8과 표 9에서 볼 수 있듯이 G'/G''값은 아스팔트 바인더가 노화된수록 그리고 CRM 첨가량이 많아질수록 또 온도가 낮아질수록 증가하고 있다. 새로 제정된 SUPERPAVE의 바인더 규정에 의하면 G'값이 클수록 소성변형에 대한 저항성이 큰 것으로 정의 되어있다.

5. Marshall 방법에 의한 배합설계 결과

표 10에서는 CRM을 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물 (습식 및 건조 배합)의 최적 아스팔트 바인더량을 보여주고 있다.

표 10 CRM을 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 배합설계 결과

HMA의 종류	최적 바인더량, %	공극율, %	안장도, kg	Flow, l/100cm
밀입도, AC-20 표준 배합	5.7	4	1113	30
밀입도, AC-5/15%WRP30	7.2	4	833	38.1
Gap-graded, AC-5/15%WRP30	8.4	4	667	38.1
밀입도, Ecoflex binder	7.0	4	1032	34.5
밀입도, AC-5/10%GY	5.6	4	995	22.9
밀입도, RUMAC, 2% CRM	9.5	4	471	66
Gap-graded, RUMAC, 2% CRM	9.7	4	536	74.7
Gap-graded, RUMAC, 3% CRM	8.0	4	415	73

6. 아스팔트 콘크리트 혼합물의 Aging 방법

본 실험에 사용된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 aging 방법은 Von Quintus가 1991년도에 제안한 forced-draft oven aging 방법을 사용하였고 그 내용은 아래와 같다.

* 단기노화방법 : 마샬다짐 방법에 의하여 만들어진 시료를 135°C의 forced-draft oven에 8 시간 동안 노화시킨다.

* 장기노화방법 : 마샬다짐 방법에 의하여 만들어진 시료를 60°C의 forced-draft oven에서 2 일간 노화시킨 다음 계속해서 107°C의 온도의 oven에서 노화시킨다.

7. 아스팔트 콘크리트 혼합물에 관한 실험

(1) 간접 인장강도 실험

간접 인장강도시험은 SHRP Protocol 07에 정의되어있는 방법에 의하여 시행되었으며 직경 16.2 cm (2 inch)의 마샬 시험시료를 이용하여 diametral 축 방향으로 압축 파괴하여 아래의 식에 의하여 계산되었다.

$$S_t = \frac{50.127 \times P}{t} \left[\sin \left[\frac{1455.313}{D} \right] - \left[\frac{12.7}{D} \right] \right] \quad (1)$$

S_t = 간접인장강도, kPa

P = 시험시료에 가해진 최대하중, N

t = 시험시료의 두께, mm

D = 시험시료의 직경, mm

(2) 간접 인장강도 실험결과

표 11 에는 마샬 배합설계에 사용되었던 여러 가지 아스팔트 콘크리트 혼합물에 대한 간접 인장강도 시험의 결과가 노화단계별로 정리되어있다.

표 11 여러 가지 아스팔트 콘크리트 혼합물에 대한 간접 인장 강도 시험결과

HMA 종류	간접인장강도, kPa			Unaged 시료에 대한 강도비율	
	Unaged	S-A	L-A	S-A/Unaged	L-A/Unaged
표준배합, AC-20	701.3	1003.7	1751.3	1.43	2.50
밀입도, Ecoflex	750.1	890.0	1366.1	1.19	1.82
밀입도, 습식배합	406.9	837.2	823.3	2.06	2.02
Gap-graded, 습식배합	493.1	837.9	713.0	1.70	1.45
밀입도, RUMAC, 2%	298.6	742.7	831.0	2.49	2.78
Gap-graded, RUMAC, 2%	429.6	747.5	788.9	1.74	1.84
Gap-graded, RUMAC, 3%	305.5	435.1	554.4	1.42	1.81

전반적으로 CRM을 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 인장강도는 AC-20을 사용하여 표준 배합된 아스팔트 콘크리트의 인장강도 보다 낮았지만, CRM을 포함한 아스팔트 콘크리트 혼합물은 AC-5를 기본 바인더로 사용하였으므로 AC-20을 사용한 배합과의 강도비교는 별로 의미가 없다고 본다. 단기 및 장기 노화방법에 의한 인장강도의 증가는 표 11의 노화단계별 강도 증가 비율로 잘 나타나지고 있지만 예외적으로 gap-graded의 습식배합과 Ecoflex를 이용한 밀입도의 습식배합의 경우에는 장기노화에 의한 강도증가량이 단기노화에 의한 강도증가량 보다 비슷하거나 오히려 약간 작게 나타났다.

(3) 회복 탄성계수 실험

SHRP Test Protocol 07에 의하면 아스팔트 콘크리트 혼합물의 회복 탄성계수 측정은 반복하중을 이용하여 간접 인장강도 시험에서 얻어진 결과를 회복 탄성계수 측정시 초기 재하하중을 결정하는 자료로 사용하게 되어있다. 250C 에서 실행된 간접 인장

강도 시험 값의 30% 와 15% 그리고 5%가 각각 5°C 와 25°C 그리고 40°C 에서 실행되는 회복 탄성 계수 시험의 초기 재하하중을 선정하는 값으로 사용되어진다.

회복 탄성계수시험에 사용되는 하중조건은 일정량의 반복 cyclic 하중을 0.1 초의 재하시간과 0.9 초의 휴식기간으로 구성되어 있으며, 그 하중이 반복적으로 시료에 작용하여 그 결과 시료에 발생하는 횡방향 및 수직방향의 변형량이 회복 탄성계수의 계산에 아래와 같이 사용된다.

$$\mu_{Rt} = 3.59 \times \frac{\Delta H_t}{\Delta V_t} - 0.27 \quad (2)$$

$$M_{Rt} = P \times \frac{\mu_{Rt} + 0.27}{t \times \Delta H_t} \quad (3)$$

ΔH_t = 총 recoverable 횡 방향변형, mm

ΔV_t = 총 recoverable 수직방향변형, mm

t = 시료의 두께, mm

μ_{Rt} = 포아송 비

P = 반복하중, N

M_{Rt} = 총 동 탄성 계수, M_{Rt}

(4) 회복 탄성계수 실험결과

표 12 에는 여러 배합에 대한 회복 탄성계수 값이 정리되어 있다. 아주 정교한 측정이 요구되어지는 이 실험특성상 결과가 일정하지 않음을 볼 수 있으나 일반적으로 단기 및 장기노화된 CRM 아스팔트 콘크리트가 표준 배합된 혼합물 보다 노화현상에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

표 12 온도별 및 노화단계별 동탄성계수

AC 혼합물	회복 성 계 수 (MR), MPa								비 율	
	Unaged		단기 노화		장기 노화		단기노화+Unaged		장기노화+Unaged	
	M.25	M.40	M.25	M.40	M.25	M.40	M.25	M.40	M.25	M.40
표준배합 AC-20	341	187	304	247	490	155	1.16	1.32	1.44	0.83
습식배합 말임도	278	215	268	478	242	343	0.96	1.94	0.87	1.59
말임도 2% RUMAC	232	171	440	356	434	245	1.90	2.06	1.87	1.43
Gap-graded 2% RUMAC	181	173	349	168	167	200	1.93	0.97	0.92	1.16

8. 결과

(1) CRM을 사용한 아스팔트 바인더의 점도증가는 CRM의 크기와 첨가량에 따라 좌우되며 가는 CRM을 사용한 경우의 점도가 굵은 CRM을 사용한 경우보다 높은 점도를 기록했고 굵은 CRM을 사용한 경우의 반응시간이 길어져서 반응 pattern 이 상이 했음을 알 수 있다.

(2) 아스팔트 바인더의 단기노화에 의한 점도증가는 CRM으로 개질 된 아스팔트가 일반 아스팔트 시멘트 보다 크며 CRM 첨가량이 클수록 단기노화에 의한 점도증가량도 큰 것으로 나타났다.

(3) CRM으로 개질 된 아스팔트 바인더의 단기노화에 의한 중량감소율은 일반 아스팔트 보다 우수한 것으로 나타났다

(4) CRM을 사용한 아스팔트 바인더의 G^* 값이 일반 아스팔트 보다 크게 나타났으며 단기노화 역시 G^* 값을 증가시키는 것으로 나타났다. (특히 40°C 와 50°C).

(5) CRM을 사용한 아스팔트 바인더의 G'/G'' 값은 일반 아스팔트 보다 크며 G'' 값은 CRM 혼입량에 비례한다. G'/G'' 값이 높다는 것은 높은 온도에서 소성변형에 더욱 강하다는 뜻이며 그런 면에서 CRM을 사용한 아스팔트 바인더가 일반 아스팔트 보다 소성변형에 강하다고 말할 수 있다.

(6) 마찰 배합설계 방법에 의해서 최적 바인더량이 정해졌으며 아스팔트 콘크리트 혼합물의 간접 인장 강도시험의 결과에서 보이듯이 단기 및 장기 노화된 혼합물의 인장 강도가 일반 혼합물의 인장강도 보다 우수하다.

참고 문헌

1. Bell, C. A., Y. Abwahab, and M. E. Christi "Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures" Serviceability and Durability of Construction

- Materials. Proceedings of the First Materials Engineering Congress, ASCE, Denver, Colorado, 1990
2. Mix Design Method for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types, MS-2, Asphalt Institute, Lexington, KY, 1993
 3. Von Quintus, H. L. et. al. NCHRP 338: Asphalt Aggregate Mixture Analysis System, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1991
 4. AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1994
 5. McGennis, R. B., S. Shuler, and H. U. Bahia, Background of SUPERPAVE Asphalt Binder Test Methods, FHWA Report FHWA-SA-94-069, U.S. Department of Transportation, 1994 