JOURNAL of the Korean Asphalt Institute Vol. 13, No. 2, 339-347, 2023
https://doi.org/10.22702/jkai.2023.13.2.28

pISSN: 2234-0785
eISSN: 2635-9553

Scientific Paper

재활용비율에 따른 순환아스팔트 혼합물의 절대점도, GPC 및 PG 판정온도를 이용한 회생수준평가

김원배[1] · 김우현[2] · 김영삼[3] · 김광우[4]*
[1]강원대학교 토목공학과 석박사과정, [2]에스아이 페트로케미칼스 연구소장,
[3]강원대학교 지역건설공학과 박사수료, [4]강원대학교 지역건설공학과 명예교수

Evaluation of recovery level of recycled asphalt mixture by RAP contents using absolute viscosity, GPC and PG pass/fail temperature

Wonbae Kim[1], Woohyun Kim[2], Yeongsam Kim[3] and Kwang W. Kim[4]*
[1]Graduate Student, Civil Engineering, Kangwon National University
[2]Research Director, SI Petrochemicals
[3]Ph.D. Candidate, Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University
[4]Professor Emeritus, Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

***Corresponding author:** Tel. +82-33-250-7283, E-mail. futurepaver@hanmail.net

Received: December 10, 2023; **Revised:** December 23, 2023; **Accepted:** December 26, 2023

ABSTRACT

The reclaimed asphalt pavement (RAP) should be properly rejuvenated when it is used in a recycled asphalt mixture. In this study, a RAP was used for recycled mix with recycle ratios of 30, 40 and 50 wt. % without rejuvenator. A 19 mm virgin aggregate for binder-course mixes, and a PG58-22 asphalt were used for recycled mixes, and a PG64-22 was used for a normal (control) mix. The asphalt binders were recovered from the RAP, normal mix and recycled mixes by Abson method. Absolute viscosity at 60°C, kinematic viscosity at 135°C, PG grading, G*/sin δ and pass/fail (P/F) temperatures were measured from the recovered binders by a dynamic shear rheometer (DSR). Gel-permeation chromatography (GPC) was used to measure large molecular size (LMS) of binder from the dissolution of mixture particle without binder recovery for estimation of physical properties of asphalt. The recovered binder properties including absolute viscosity (AV), G*/sin δ and P/F temperature were found to be increased by the recycling ratio increases. The regression analyses between AV and LMS, and P/F temp. and LMS showed high correlations with $R^2 > 0.99$, respectively. Therefore, it was possible to estimate AV and P/F temp. reliably by LMS. According to Korean guide-line, recycled mixes failed to pass the limit of AV $\leq$ 5,000 p except for 30% recycled mix. However, all recycled mixes should be prepared using a rejuvenator when evaluated by P/F temp. method of the Asphalt Institute method, because the P/F temp. of recovered binders were 6°C on average higher than expected values.

Keywords: Recycled asphalt mix, aging, absolute viscosity, pass/fail temperature, large molecular size (LMS)

© 2023 by Korean Asphalt Institute. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

노후포장에서 발생하는 회수아스팔트포장(reclaimed asphalt pavement: RAP) 재료는 순환활용이 가능한 고급의 자원이다. 국내의 자원 여건과 환경을 고려할 때 RAP의 순환사용은 친환경성은 물론 경제성 면에서도 매력이 있는 대안이다. 따라서 안정적 품질의 순환아스팔트 혼합물 사용의 확대는 여러 가지 면에서 유리한 점이 많다. 그러나 RAP의 재활용 통계를 살펴보면 전체 RAP 발생량의 일부만이 순환아스팔트 혼합물(이하 순환혼합물) 생산에 사용되고 있으며, 순환혼합물이 차지하는 비율은 2021년 기준 약 20% 미만에 불과하다(Engineering Journal, 2021).

순환혼합물이 적극적으로 사용되지 못하는 원인 중 하나는 순환혼합물의 품질확보가 어려운 점에 있다. RAP은 발생원인, 장소, 공용기간, 혼합물종류 등에 따라서 다양하게 차이가 나므로 순환혼합물의 품질도 유동적이다. 이는 RAP의 사용량이 증가할수록 더 가변적인 경향을 보인다.

순환혼합물의 품질은 RAP의 사용비율이 변하더라도 일반혼합물 품질에 준한다. 순환혼합물 생산기준인 KS 2349에 의하면 가열순환혼합물 제조 시 RAP 사용비율은 25% 이상으로 하고 있다. RAP 사용 비율이 25% 이상이면 Blending Chart(Asphalt Institute, 2014)를 활용하여 필요시 적정한 재생첨가제 (rejuvenator)의 사용을 요구하여야 하나 국내에서는 무조건 사용을 요구하고 있다. 따라서 RAP의 아스팔트 함량, 굵은골재 최대치수, 노화정도, RAP 사용비율, 신규바인더 등급에 관계없이 재생첨가제를 사용해야 한다.

본 연구의 목적은 선정된 RAP의 사용량에 따라서 배합설계 시 목표로 한 순환 혼합물의 회생 수준이 목표치와 부합되는지 여부를 평가하는 것이다. 즉, 배합설계 시 RAP과 신규아스팔트의 점도, $G^*/\sin\delta$의 변수를 고려하여 결정한 신규 아스팔트를 첨가하여 RAP 사용비율 30, 40, 50% 순환혼합물을 제조하였다. 그리고 순환혼합물 성능시험 후 추출·회수한 바인더의 시험을 수행하고 그 값들을 비교하여 순환혼합물의 회생 수준을 평가하고 재생첨가제의 사용여부를 판단하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 전남 순천지역에서 수집된 RAP을 사용하고, 신규 골재로는 국내에서 일반적으로 사용되는 굵은골재 최대치수 19 mm 화강암 쇄석을 사용하여 중간층용 아스팔트 혼합물 제조하였다. 아스팔트는 PG64-22 (AP-5), PG58-22(AP-3) 두 종류를 사용하였다.

2.2. 실험방법

RAP에 함유된 아스팔트의 특성을 분석하고자 Abson Recovery 방법에 의거 RAP 바인더를 추출 회수하였다 (KS F 2381, ASTM D 2172). RAP에 포함된 아스팔트 함량을 측정하기 위하여 KS F 2490(연소법을 이용한 아

스팔트 함량 결정방법)을 사용하였다. RAP에서 추출·회수한 바인더, 신규 아스팔트 및 순환혼합물의 성능시험 후 공시체로부터 추출 회수한 바인더에 대하여 60°C 절대점도(Absolute viscosity: AV) 시험, 135°C 동점도(Kinematic viscosity: KV) 시험, DSR(Dynamic shear rheometer) 시험(Asphalt Institute, 2002) 및 GPC (gel-permeation chromatography) 시험을 수행하였다.

본 연구에서는 아스팔트의 노화특성을 분석하기 위하여 GPC를 이용한 색층분석(chromatography) 시험을 수행하였다. Fig. 1에서 보여주듯이 크로마토그램은 분자입자의 분포를 보여주는 하나의 곡선이며, 이 곡선이 수평기선(Base line)과 이루는 전체면적을 100%로 하여 필요한 구간에서의 면적 비(%)를 구하여 분석에 사용하였다. 아스팔트가 노화되면 아스팔틴(Asphaltene)이 증가되어 경화되며 점도가 높아진다. 이를 크로마토그램으로 분석하면 대형분자(Large Molecular Size: LMS) 비율의 증가로 나타나므로 LMS의 증가정도와 노화도는 밀접한 관계가 있다(Kim et al., 2015). Fig. 1에서 보듯이 노화된(Aged) 아스팔트는 신규(Virgin) 아스팔트보다 LMS 부분이 불룩하여 비율이 큰 것을 알 수 있다.

일반(비개질) 아스팔트의 절대점도 AV(y)와 LMS(x)의 관계는 기존 연구의 회귀분석으로 얻어진 모델 식 $y = 13.082e^{0.3204x}$ 과 같이 나타낼 수 있다(Kim et al., 2020). 본 연구에서는 RAP과 혼합물로부터 Abson방식으로 추출 회수한 바인더로부터 DSR 값과 AV를 측정하였다. 또한 바인더를 추출하지 않고 혼합물 입자를 무작위 샘플링하여 바로 Tetrahydrofuran(TFH) 솔벤트에 녹여 용액의 샘플을 채취하여 GPC로 LMS를 측정하고 회수 바인더에서 측정한 AV와 LMS로 회귀분석을 수행하고 최적회귀모델을 구하여 AV 값을 추정(EAV)하였다.

이 방법의 장점은 혼합물을 녹여 바인더를 추출·회수하는데 수반되는 오차 없이 노화특성을 절대점도 추정치로 파악할 수 있다는 점이다. 이에 대한 자세한 사항은 Kim et al.(2006)에 수록되어있으며, GPC 분석방법에 대한 일반적인 사항은 Kim and Burati(1993), Kim et al.(1995; 2015), Doh et al.(2008)에 상세히 수록되어있다.

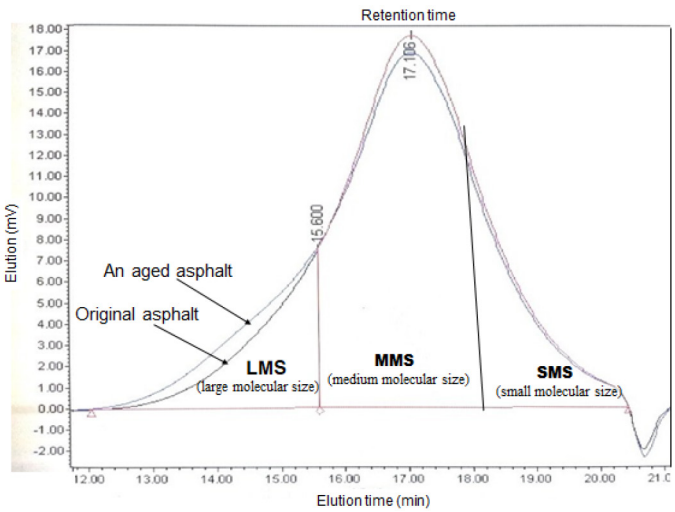

Fig. 1. Illustration of chromatograms and 3 molecular sizes

3. 결과 및 고찰

3.1. 절대점도와 LMS의 관계

연구에 사용된 RAP은 2.5 mm(#8번)체로 체가름 하여 구분하고 연소방식으로 측정한 아스팔트 함량 평균은 6.11%였다(Table 1). 아스팔트 및 골재의 물리적 특성[침입도, 절대점도(AV), 동점도(KV)]는 Table 2와 같고 DSR의 판정온도[pass/fail temperature: P/F temp.]는 Table 3과 같다. 사용된 RAP은 AV가 9,165 poise(p), DSR 판정온도가 81.3°C로 노화가 심하지 않은 상태였다. 따라서 신규바인더로 PG58-22(AP3)를 재생첨가제 없이 사용하였다.

Table 4는 사용된 아스팔트와 혼합물로부터 추출·회수된 바인더에서 측정된 AV와 LMS, KV를 보여준다. 이 표에 사용된 용어는 다음과 같다. CON-R0는 64-22로 RAP(R)을 사용치 않은 (0%) 일반혼합물, 58-R30은 58-22바인더로 RAP을 30% 사용한 순환혼합물, 58-R40은 58-22로 RAP을 40% 사용한 순환혼합물, 58-R50은 58-22로 RAP을 50%를 사용한 순환혼합물이며, R100은 RAP 100% 그 자체이다.

Table 4의 두 가지 바인더, 4가지 혼합물과 RAP의 LMS와 AV의 회귀분석 결과를 Fig. 2에서 보여준다. $R^2 > 0.99$로 AV와 LMS는 상관관계가 매우 우수하게 나타나서 최적회귀모델 $y = 12.591e^{0.3245x}$ 의 x에 LMS를 대

Table 1. Asphalt content (%) of RAP

Classification	Weight (%)	Asphalt content (%)
≥ 2.5 mm	45	4.47
< 2.5 mm	55	7.46
Average		6.11

Table 2. Rheological properties of each binder

Material	LMS (%)	Pen. (25°C, 1/100 cm)	Abs. viscosity (60°C, poise)	Kin. viscosity (135°C, cP)
PG58-22	14.31	89.0	1,305	325
PG64-22	15.62	74.0	1,891	375
RAP binder	20.50	30.6	9,165	1,841

Table 3. Results of DSR test for each binder

Binder		Temp. (°C)	G*/sin δ	Criteria (kPa)	Test Status	High service temp. (°C)	P/F temp. (°C)
PG58-22	Orignal	58.0	1.565	1.0	P	58	62.9
	RTFO	58.0	2.503	2.2	P		
PG64-22	Orignal	64.0	1.382	1.0	P	64	67.1
	RTFO	64.0	3.046	2.2	P		
RAP binder	Orignal	76.0	1.962	1.0	P	76	81.3
	RTFO	76.0	2.710	2.2	P		

입하며 얻어진 y는 AV의 추정치 EAV이므로 식 (1)로 나타내었다.

$$EAV = 12.591e^{0.3245(LMS)} \tag{1}$$

여기서, EAV= estimated absolute viscosity (p)이며, LMS= large molecular size (%)이다.

또한 Table 4의 측정 AV(Measured AV: MAV)와 식 (1)로 추정한 AV(estimated absolute viscosity: EAV)의 회귀분석 결과를 Fig. 3에서 보여준다. Fig. 3의 R^2 값도 Fig. 2와 같으므로 식 (1)로 추정한 절대점도는 실측치와 매우 유사하며 신뢰성이 높다 할 수 있다. 따라서 이후 분석은 EAV 값으로 하였다.

3.2 회수 바인더 특성

RAP을 0, 30, 40, 50% 사용한 혼합물로 공용성 시험을 수행한 후 공시체로부터 추출·회수하여 바인더 특성시험을 수행하였다. 시험 결과는 Tables 5, 6에서 보여주며 AV, LMS, KV는 RAP의 양이 증가하면서 높아짐을 알 수 있다.

Table 4. AV, LMS and KV

Mixtures	AV (p)	LMS (%)	KV (cP)
PG58-22	1305	14.31	325
PG64-22	1891	15.62	375
CON-R0	3,601	17.45	575
58-R30	4,754	17.98	575
58-R40	5,849	18.85	650
58-R50	7,211	19.59	850
R100	9,165	20.50	1,841

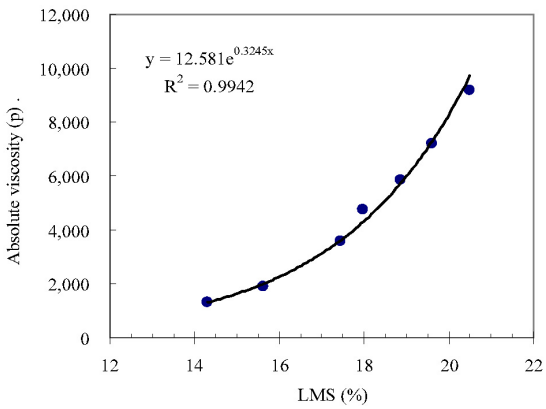

Fig. 2. Relation of AV and LMS

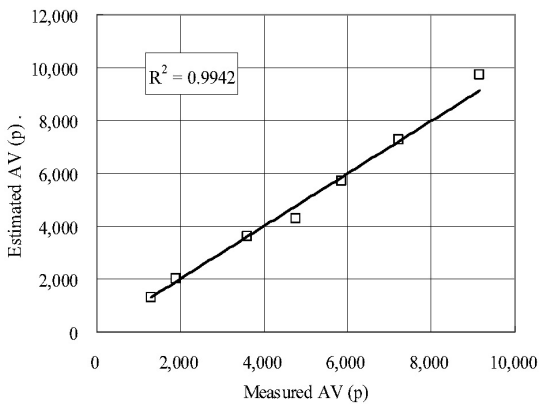

Fig. 3. Relation of MAV and EAV

Table 5. Properties of recovered binder after performance test

Mixtures	AV (p)	LMS (%)	EAV (p)	KV (135°C, cP)
CON-R0	3,601	17.45	3,622	547
58-R30	4,754	17.98	4,301	575
58-R40	5,849	18.85	5,705	650
58-R50	7,211	19.59	7,253	850
R100	9,165	20.50	9,744	1,841

Table 6. Results of DSR test of virgin and recovered asphalt from each mix

RAP content	Temp. (°C)	Modulus (G*)(kPa)	Phase angle (δ°)	G*/sin δ (kPa)	Status criteria	Test Status	High service temp. (°C)	P/F temp. (°C)
PG64-22	64.0	1.381	87.91	1.382	1 kPa	P	64	67.1
	70.0	0.646	88.66	0.646		F		
CON-R0	64.0	2.047	86.03	2.052	1 kPa	P	70	70.1
	70.0	1.007	87.52	1.008		P		
	76.0	0.490	88.32	0.491		F		
58-R30	70.0	1.113	87.14	1.115	1 kPa	P	70	70.9
	76.0	0.535	87.75	0.534		F		
58-R40	70.0	1.477	86.53	1.480	1 kPa	P	70	73.3
	76.0	0.722	87.83	0.723		F		
58-R50	70.0	2.157	84.93	2.165	1 kPa	P	76	76.4
	76.0	1.046	86.57	1.048		P		
	82.0	0.521	87.77	0.522		F		
R100	70.0	4.281	83.60	4.008	1 kPa	P	76	81.3
	76.0	1.956	85.59	1.962		P		
	82.0	0.917	86.91	0.968		F		

PG64-22(AP5)로 제조한 일반혼합물(CON-R0) 회수바인더의 점도는 3,601 p(추정점도 3,622 p)로 나타났고, RAP의 함량이 증가할수록 순환혼합물의 LMS와 EAV는 증가하였다. 국토부 기준에 의하면 순환아스팔트 혼합물의 회수바인더의 AV는 5,000 p 이하이어야 한다(MOLIT, 2021). Table 5의 30% 순환혼합물(58-R30)의 EAV는 4,301 p로 국토부 기준 5,000 이하를 만족하였다. 하지만 40%와 50%(Table 5의 58-R40, 58-R50)는 5,705과 7,253으로 모두 기준을 상회하여 만족하지 못한다. 이는 비록 아스팔트를 한 등급 낮은 58-22(AP3)를 사용했고, RAP의 노화도가 비교적 낮은 편이지만 기준에 만족치 못하므로 재생첨가제의 사용이 필요한 경우라 할 수 있다. 즉, 30% 재생까지는 신규아스팔트 58-22 사용으로 가능하지만 40% 이상 재활용은 재생첨가제가 필요한 것이다.

DSR 데이터와 LMS간의 상관관계 분석 결과를 Figs. 4, 5에서 보여준다. Fig. 4는 Table 6의 70°C에서의 G*/sin δ 데이터와 LMS의 회귀분석 결과이며, $R^2 = 0.9342$로 LMS 증가에 따라 고온강성이 증가하는 경향을 잘

보여준다. 따라서 LMS로도 G*/sin δ 값의 추정이 가능함을 알 수 있다. Table 6에서 DSR 시험결과 모든 데이터가 있는 온도는 70°C이므로 이온도에서의 G*/sin δ 값을 비교분석하였다. PG64-22 바인더의 G*/sin δ는 0.646 kPa, 일반혼합물 회수바인더는 1.008 kPa, 30, 40, 50% 재생 회수바인더는 재생비율이 증가할수록 1.115, 1.480, 2.165 kPa로 증가하였다. Table 5의 LMS로부터 Fig. 4의 회귀모델을 이용하여 추정하면 같은 경향이나 1.279, 1.749, 2.282 kPa로 다소 더 높게 나타났다.

Fig. 5는 Table 6의 P/F온도 데이터와 Tables 2, 5의 LMS 데이터의 회귀분석 결과이며 $R^2 > 0.99$로 매우 밀접한 관계를 보였다. 따라서 LMS로 재생혼합물 바인더의 P/F 온도를 신뢰성 높게 추정이 가능함을 알 수 있다. Table 6에서보면 P/F 온도도 재생비율이 0, 30, 40 50%로 높아짐에 따라 70.1, 70.9, 73.3, 76.4°C로 높아졌다. 특히 고온등급으로 보면 일반바인더가 PG64 등급인데 이로 제조한 일반 혼합물(CON-R0) 회수바인더의 P/F 온도가 70.1로 나타나 혼합물 제조 시 단기노화 등으로 높아진 것이 원인이라 사료된다.

Fig. 5의 회귀모델을 이용하여 Table 5의 0, 30, 40, 50%의 LMS로 P/F 온도를 추정한 결과는 69.6, 70.9, 73.7, 76.6°C로 나타났다. 일반바인더 PG64등급으로 제조한 일반혼합물의 바인더 추정치가 69.6으로 70 이하로 나타났고, 30~50%까지의 추정치는 측정치(70.9, 73.3, 76.4°C)와 매우 유사하다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 LMS로 G*/sin δ보다는 P/F온도의 추정이 더 정확한 것을 알 수 있다.

3.3 회생수준의 판정

RAP 바인더의 P/F온도 측정값과 신규바인더의 PG 고온 값으로 RAP 재생비율에 따른 순환혼합물의 노화정도를 추정할 수 있다. 즉, Asphalt Institute(AI)에서 제시한 방법으로 P/F 온도를 이용하여 순환혼합물의 노화도를 추정할 수 있다(Asphalt Institute, 2014). 이 방법은 Fig. 6과 같이 RAP 100%의 P/F 온도인 81.3°C와 신규바인더의 고온등급 58°C를 RAP%-Temp. 좌표에 직선으로 연결하고 해당 RAP %에 수직선을 그어 P/F 온도를 추정할 수 있다. Fig. 6에서 보듯이 이 방식으로는 30%는 65.0, 40%는 67.3, 50%에서는 69.7°C이 얻어졌다. 이는 P/F 온도가 81.3°C인 RAP을 58 바인더로 재활용 할 경우 RAP 30%, 40%, 50%에서 P/F 온도가 각각 65.0, 67.3,

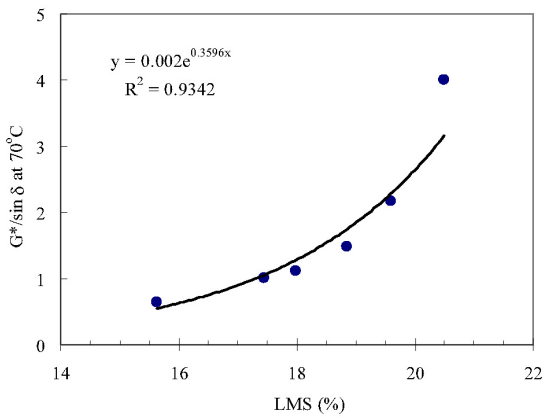

Fig. 4. Relation of G*/sin δ and LMS

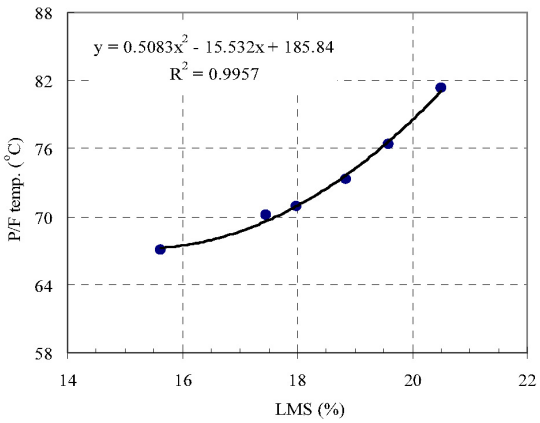

Fig. 5. Relation of P/F temperature and LMS

69.7°C이 될 것이라는 의미이다.

그러나 Fig. 7에서와 같이 DSR로 실제 측정한 P/F 온도를 적용하고 선형회귀분석 하여 RAP 30, 40, 50%에서의 P/F 온도를 추정하면 72.6, 73.9, 75.2°C가 얻어진다. 이는 Fig. 6의 추정치보다는 훨씬 높으나 실제 측정치 70.9, 73.3, 76.4와 비교하면 근사 값이라 할 수 있다. 그러나 앞서 LMS로 추정한 P/F 온도는 69.6, 70.9, 73.7, 76.6°C로 실측치와 더 근사한 결과임을 다시 알 수 있어 LMS로 P/F온도의 추정이 매우 유효함을 재확인할 수 있다.

AI 방식의 추정치(65, 67.3, 69.7°C)와 실제측정치 70.9, 73.3, 76.4°C와 비교하면 RAP 함량 30%에서는 거의 70에 근접하나 40, 50%에서는 6.0, 6.7°C의 차이로 PG 단위로 한 등급 높은 온도이다. 따라서 올바른 재활용을 위해서는 재생첨가제를 적정량 첨가하여 P/F 온도를 AI 추정치 수준으로 낮추어야 한다. 즉, 재생첨가제의 사용으로 모두 70이하(64 등급)가 되도록 해야 할 것이다. 그리고 이렇게 될 경우 현재 30% 재생에서만 만족되던 국토부 기준의 순환아스팔트 혼합물 회수바인더의 AV ≤ 5,000 p를 나머지 40, 50% 재생에서도 만족할 것으로 추정 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 RAP을 추출·회수하여 특성을 파악하고, RAP의 재활용비율을 0, 30, 40, 50%로 순환아스팔트 혼합물의 회수바인더 특성을 평가하였다. 일반 및 순환혼합물에서 추출한 회수바인더의 절대점도(absolute viscosity: AV), G*/sin δ, P/F온도, 대형분자(large molecular size: LMS) 특성을 분석하고 회생수준을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. RAP에서 추출·회수한 바인더는 절대점도 9,165 p, P/F온도 81.3°C, LMS 20.5%로 노화정도가 심하지 않은 것으로 확인되어 신규 바인더로 PG58-22를 사용하였다.
2. RAP 30, 40, 50% 순환아스팔트 혼합물을 제조하고 회수바인더의 특성을 AV, DSR, GPC로 분석한 결과

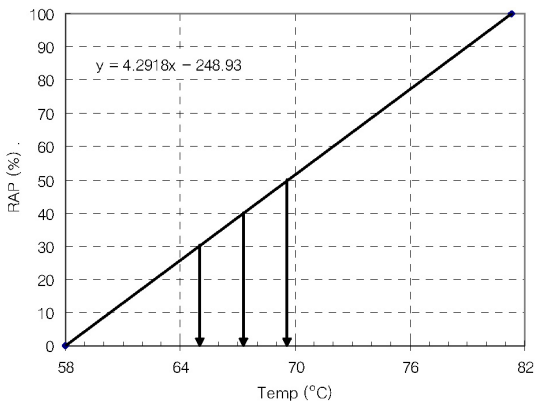

Fig. 6. Designed RAP content vs. high temperature PG relation for binder data used in this study

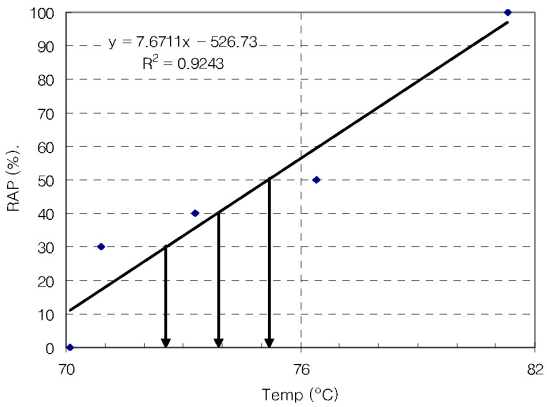

Fig. 7. Actual RAP content vs. high temperature PG relationship for the binder data used in this study

RAP 사용비율이 증가할수록 노화도가 증가하였으나, RAP 30%는 국토교통부 절대점도 기준 5,000 p 이하를 만족하였고, RAP 40, 50%는 재생첨가제가 필요함을 확인하였다.

3. LMS와 AV, LMS와 P/F 온도와의 회귀분석결과 모두 $R^2 > 0.99$였으며, 각각의 회귀모델로 추정한 절대점도와 P/F 온도는 실측치와 매우 근사한 것으로 나타나, 바인더 추출회수 없이 LMS 측정치로 이 두 특성 치를 신뢰도 높게 추정할 수 있음을 확인 하였다.
4. 미국 AI 방법에 의한 P/F온도 추정결과 3가지 재생비율 모두 PG기준으로 한 등급 높은 바인더수준이어서 모두 재생첨가제가 필요한 것으로 판정되었다. 이렇게 할 경우 국토교통부 기준 AV ≤ 5,000 p도 모두 만족할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 전남테크노파크의 연구비지원과 강원대학교 첨단건설기술연구소의 시설을 사용하여 이루어 졌다.

참고문헌

Asphalt Institute (2002). “Performance graded asphalt binder specification and testing,” Superpave Series No. 1. (SP-1).

Asphalt Institute (2014). “Asphalt mix design methods,” Manual series No. 2 (MS-2), 7th Edition.

Doh, Y.S., Amirkhanian, S.N. and Kim, K.W. (2008). “Analysis of unbalanced binder oxidation level in recycled asphalt mixture using GPC”, Construction and Building Materials, 22(6), pp. 1253-1260.

Engineering Journal (2021). http://www.engjournal.co.kr/news/articleView.html?idxno=1476

Kim, K.J., Kim, Y., Kim, K.W. and Kim, S. (2020). “Rejuvenation effect of particular WMA additive for warm-mix asphalt recycle”, Journal of the Korea Asphalt Institute, 10(1), pp. 54-62.

Kim, K.W. and Burati, J.L. (1993). “Use of GPC chromatogram to characterize aged asphalt cement”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 5(1), pp. 41-52.

Kim, K.W., Burati, J.L. and Park, J.S. (1995). “Methodology for defining LMS portion in asphalt chromatogram”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 7(1), pp. 31-40.

Kim, K.W., Kim, K.A., Doh, Y.S. and Amirkhanian, S.N. (2006). “Estimation of RAP's binder viscosity using GPC without binder recovery”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 18(4), pp. 561-567.

Kim, Y.S., Kwon, O., Kim, S., Han, J.Y., Yun, J. and Kim, K.W. (2015). “Reliable estimation of binder properties using large molecular size (%) from asphalt mixtures”, New Frontiers in Road and Airport Engineering, ASCE, 2015(Oct.), pp. 152-161.

MOLIT (2021). “Production and construction of asphalt mixtures”, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong City, Republic of Korea.