

Scientific Paper

RAP 재활용시 특정 WMA 첨가제의 노화회생효과

김경진¹ · 김영삼² · 김광우³ · 김성운^{4*}

¹한국교통대학교 토목공학과 교수, ²강원대학교 지역건설공학과 박사수료, ³강원대학교 지역건설공학과 명예교수,
⁴강원대학교 지역건설공학과 전임강사

Rejuvenation effect of particular WMA additive for warm-mix asphalt recycle

Kyeong-Jin Kim¹, Yeong-Sam Kim², Kwang Woo Kim³ and Sungun Kim^{4*}

¹Professor, Division of Civil, Environmental & Urban-Transportation Engineering, Korea National University of Transportation

²Doctorate Completion, Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

³Professor Emeritus, Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

⁴Lecturer, Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

*Corresponding author: Tel. +82-33-250-7283, E-mail. sungun2001@hanmail.net

Received: May 29, 2020; Revised: June 18, 2020; Accepted: June 22, 2020

ABSTRACT

This study evaluated possibility of using warm-mix asphalt (WMA) additives for recycling recovered binder using normal virgin binder based on absolute viscosity, kinematic viscosity, penetration and the large molecular size (LMS). The recovered binder by Abson method from various reclaimed asphalt pavements (RAP) was dissolved into virgin binder by weight of 20% and 30% of total binder and WMA additives were added to make recycled WMA binder. Two types of WMA additives, Evotherm (EV) and Sasobit (SA), and a virgin binder, PG58-22, were used. It was found that EV was effective, but SA was not. The results indicated that EV reduced LMS and viscosity and increased penetration of the recycled binder by adding 0.3, 0.5 and 0.7 wt% in 20% and 30% recycled binders. EV could be used for recycle up to 30% of the recovered binder without using rejuvenator at 135°C and 115°C. Therefore, according to this study results, it was concluded that the additive EV could be efficiently used for WMA recycle without using rejuvenator.

Keywords: WMA additive, RAP, kinematic viscosity, penetration, large molecular size, Abson method, recycled WMA binder



1. 서론

가열아스팔트 혼합물(Hot-mix asphalt: HMA)의 온도를 낮추어 준고온 아스팔트 혼합물(Warm-mix asphalt : WMA)을 생산하는 공법은 다양하나 플랜트에서 WMA 첨가제를 사용하는 방법이 가장 일반적이다. 회수 아스팔트 포장재료(Reclaimed asphalt pavement: RAP)의 재활용 시에도 WMA 첨가제를 사용하여 준고온에서 재활용하기 위한 연구와 시험포장 등이 진행되고 있다. RAP의 재활용 시 WMA 첨가제는 혼합물의 가사온도(Working temperature)를 WMA 수준으로 낮추어 주어야하므로 재생바인더의 동점도를 낮추어 작업이나 다짐이 잘되게 해주는 역할을 해야 한다. 또한 기존의 RAP은 대부분 HMA이므로 이의 WMA로의 재활용은 재생바인더의 노화 상태를 어느 정도 회생 시켜주는 역할을 할 것이다(Lee et al., 2009). 이 경우 별도의 재생첨가제를 사용하지 않아도 되는 이점이 있다(Doh et al., 2010).

따라서 본 연구에서는 135°C 정도의 준고온에서 아스팔트를 재활용하기 위한 기초 연구로서 외국에서 개발된 2가지 첨가제를 사용하여 노화된 RAP을 일정비율 재생시 어떤 효과를 내는지를 고찰하였다. 이를 위해 RAP으로부터 노화된 아스팔트를 Absorb 방법으로 회수(Recover)하고 이를 20%와 30% 신규 아스팔트와 혼합하면서 준고온화 첨가제의 첨가가 혼합된 바인더의 노화특성을 얼마나 회생시키는지 분석하였다. 따라서 본 연구의 목적은 준고온화 첨가제가 노화 바인더와 희석된 재생바인더의 노화 상태를 재생첨가제 없이 어느 정도 회생시키는지 분석을 통하여 준고온으로 아스팔트를 재활용함에 있어서 그 가능성을 확인하고 하는 것이다.

이를 위하여 본 연구에서는 아스팔트의 대형분자(Large molecular size: LMS)와 동점도(kinematic viscosity)와 침입도를 구하여 분석에 사용하였다. LMS는 절대 점도, 고온 강성지수($G^*/\sin \delta$), 침입도, 동점도 등과 상관성이 높은 특성 치로 알려져 있다(Baek et al., 2009; Kim et al., 2011). 그러므로 재생바인더에 준고온화 첨가제의 유무 및 그 첨가비율에 따른 LMS, 동점도, 침입도의 변화를 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용 재료

본 연구에서 사용된 신규 아스팔트(Virgin asphalt)는 재활용을 목적으로 하므로 침입도 등급이 높은 AP3(pen 80-100, PG58-22)를 사용하였다. 하지만 Table 1에서 보듯이 실내에서 측정한 평균 침입도 값은 등급 기준치인 80 이하로 벗어난 pen 60-80에 해당하였고 PG 고온등급 상으로도 70°C에 해당되는 등 상품 기준에 비하여 매우 경질인 것으로 나타났다. RAP은 경북 고령과 그 인근지역에서 수거된 것으로 이로부터 추출된 회수 아스팔트의 특성은 Table 1과 같이 절대점도와 침입도로 보면 노화가 상당히 진행된 것으로 추정된다. 이 RAP에서 추출한 절대점도로부터 RAP의 수명을 기존의 연구(Kim et al., 2016)에 의하여 추정할 경우 논문에 제시된 절대점도(y , kp)와 공용수명(x)과의 상관관계 식 $y = 2.7634e^{0.2429x}$ 의 역인 $x = (\ln y - \ln 2.7634) / 0.2429$ 로부터 구하면 11.25년이다. 즉, 이 RAP은 현장에서 약 11년 이상 공용된 것으로 추정되는 상당히 노화가 진행된 것이다.

사용된 준고온화 첨가제는 Wax계의 Sasobit(SA)와 Emulsion계의 Evotherm(EV)으로 각각 생산자 추천 첨

가량은 총 바인더 량의 2%와 0.5%이었다. 우선 SA와 EV의 첨가비율은 2%와 0.5%를 적용하고 각종 시험을 통해 첨가량의 조정을 검토하였다.

Table 1. Properties of virgin asphalt and recovered binder from RAP

Binder	LMS (%)	Penetration (0.1 mm)	Kinematic viscosity (cp)	Absolute viscosity (kp)	PG high-temp grade (°C)
AP3	16.42	72.7	371	2.52	70
Recovered	25.24	22.2	3,725	42.54	-

2.2 실험방법

2.2.1 노화아스팔트의 회수

RAP으로부터의 바인더 회수는 Abson방법에 의하여 수행되었다. 한 번에 약 60 g 정도의 노화된 상태 바인더가 회수되므로 약 1 kg 이상의 회수바인더 확보를 위해 20회 정도의 Abson recovery를 매번 Random으로 추출된 약 1,200 g의 RAP으로부터 수행하였다. 회수된 바인더는 한 개의 큰 캔에 모두 취합 후 각종 실험에 사용되었다.

2.2.2 재생 바인더와 준고온화 첨가제의 배합

재생바인더는 회수바인더와 신규바인더의 비율을 각각 2:8과 3:7로 혼합하여 제조하였다. 이는 재활용시 재생 비율 20%와 30%를 가정한 조합이다. 일단 재생비율에 따라 재생바인더가 제조되면 준고온화 첨가제를 생산자가 제시한 방법에 따라 첨가하였다.

2.2.3 GPC 시험

Fig. 1은 Gel-permeation chromatogram(GPC) 시스템을 보여 주고 있으며 Fig. 2는 GPC를 통해 샘플이 검출되어 나타난 크로마토그램의 모식도를 보여주고 있다. 크로마토그램은 분자입자의 분포를 보여주는 하나의 곡선이며, 이 곡선이 수평기선(Base line)과 이루는 전체면적을 100%로 하여 필요한 구간의 면적 비를 구한다. 하나의 GPC 곡선은 3가지 분자입도 그룹으로 분리된다. 분자 크기에 따라 초기에 LMS가 검출되고 서서히 작은 입자의 분자들이 검출되므로 시간상 앞부분은 LMS를 나타낸다. 다음 구간을 중형분자입자(Medium molecular size: MMS), 마지막 구간을 소형분자입자(Small molecular size: SMS)로 구분한다. 이렇게 구분된 구간 중 앞부분의 LMS가 아스팔트의 노화 특성과 상관관계가 높다(Jennings, 1985; Kim et al., 1993). 따라서 LMS를 구하는 방법은 매우 중요하며 그에 대한 상세한 내용은 기존 문헌에 제시되어있다(Kim et al., 1995; Kim et al., 2016).

Fig. 1에서 Aged asphalt 곡선과 같이 노화된 아스팔트는 LMS값이 크고, Original asphalt처럼 노화가 안 되었거나 노화상태가 약하면 그 값도 적다. 이는 아스팔틴(asphaltene)량과 관계가 있으며 또한 절대 점도, $G^*/\sin \delta$ 등과 상관성이 높은 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2011). 따라서 본 연구에서는 각 시료마다 LMS 값을 구하고, 이 값을 바인더의 노화 상태와 연관 지어 분석에 사용하였다.



Fig. 1. GPC system

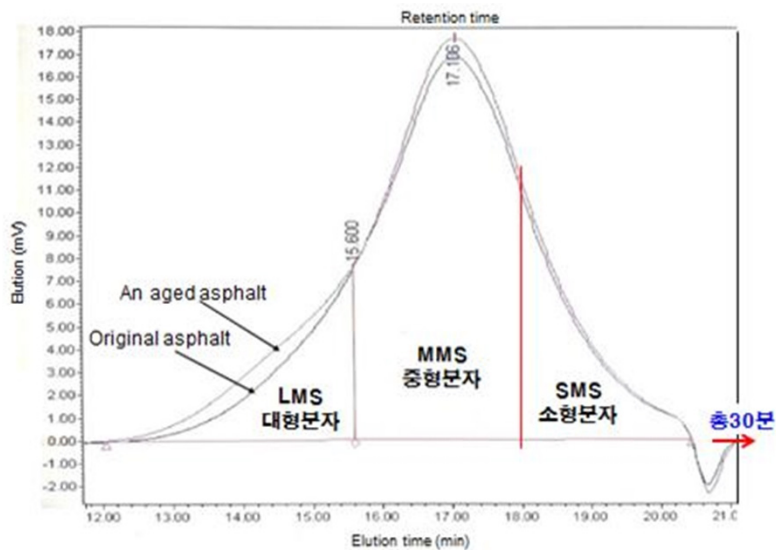


Fig. 2. Illustration of typical asphalt chromatogram

2.2.4 물리적 특성 시험

바인더의 물리적 특성으로 본 연구에서는 절대점도(Absolute viscosity: AV), 동점도(kinematic viscosity) 및 침입도를 사용하였다. 이를 위해 회전점도는 115와 135°C에서 Brook Field 점도계를 사용하여 측정하고 침입도는 25°C에서 각 샘플마다 측정하였다. 본래 회전점도는 135°C에서 측정하나 여기서는 준고온 혼합물의 다짐온도인 115°C를 목표로 하기 위해 단지 온도만 낮추어 측정하였다. 절대점도는 60°C에서 바인더의 제로(0) 전단유동을 나타내는 기준치로 진공 점도계를 사용하나 이 값은 LMS와의 상관성 분석에서 R^2 이 0.95 이상 나타나므로 본 연구에서는 선행 연구에서 제시한 관계식 (1)을 이용하여 LMS로부터 추정하였다. 본 연구에 사용된 데이터

는 모두 3회 측정의 평균값이다.

$$y = 13.082 e^{0.3204x} \quad (1)$$

여기서, y는 절대점도(p)이고 x는 LMS(%) 값이다.

3. 결과 및 고찰

회수바인더의 각종 특성은 이미 Table 1에 나타내었고 측정된 LMS는 25.24이며, Fig. 3~Fig. 7은 각 바인더 재료별 LMS 및 물리적 특성의 변화를 나타낸다. Fig. 3에서 보듯이 AP3 original 바인더의 LMS는 16.42이고 AP3에 RAP 20%와 30%만 섞인 회수바인더(그림에서 Rec% 20, 30에 함량% 0과 Addit. None)의 LMS는 18.72와 19.44가 됨을 알 수 있다. 이는 100% 회수바인더 LMS가 25.24이던 것이 AP3 신규바인더 80%와 70%에 희석됨으로써 LMS가 낮아져 그만큼 회생(Rejuvenation)된 것을 의미한다.

WMA 첨가제의 영향을 보기위해 각 재생비율별로 SA 2%와 EV를 0.3, 0.5, 0.7%씩 넣고 LMS의 저하여부를 측정하였다. Fig. 3에서 SA 2(함량 2%)의 경우 재생비율 20%에서 18.64로 SA를 넣지 않은 18.72와 거의 유사하나, 재생비율 30%에서는 LMS가 19.58로 SA를 넣지 않은 19.44보다 다소 높아져 효과를 보여주지 못했다.

반면 EV 0.5%는 사전실험에서 각 재생비율 별로 LMS를 10 정도씩 낮춰주는 효과를 보였다. 따라서 EV는 첨가량에 따른 차이 분석이 필요하여 각각 0.2% 포인트씩을 상하로 조정하여 0.3%와 0.7%에 대해서도 LMS를 측정하여 Fig. 3에 그 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 20%재활용인 Rec% 20에서는 EV함량에 따른 특정 경향이 보이지 않으나, 30% 재활용인 경우 EV 함량이 증가되면서 LMS가 낮아져서 회생효과가 EV 함량 증가에 따라 커지는 것으로 나타났다. 하지만 SA는 LMS 저하효과가 거의 없어 함량에 따른 차이를 분석할 필요가 없는 것으로 판단하였다.

이를 통해 EV는 재생바인더의 노화정도를 회생시키는 효과가 분명히 있는 것으로 판단되었다. 한편 EV 0.5%를 기준으로 볼 경우 재생비율 20%에서의 LMS 저하율은 0.897(=16.8/18.72)이며 노화바인더가 더 많이 포함된 30%에서 저하율도 0.891(=17.32/19.44)로 더 우수하여 재생 함량이 높은 경우도 회생효과가 좋은 것으로 판단되었다.

Fig. 4의 절대점도의 경우 Rec% 20의 절대점도 5.27 kp가 WMA 첨가제 EV 0.5%에 의해 2.85 kp인 54.1%(=100×2.85/5.27)로 낮아지고, Rec% 30에서는 59.7%(=100×3.96/6.63)로 40% 이상 저하되어 EV가 노화바인더의 노화정도를 상당히 효과적으로 회생시켜주는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5의 135°C 동점도의 경우에도 EV가 재생바인더의 동점도를 신규 AP3 수준(371 cP)으로 낮추어주어 회생효과가 상당히 크며 특히 0.7%에서 가장 큼을 알 수 있었다. 하지만 SA는 앞에서와 마찬가지로 동점도의 저하가 없이 오히려 30% 재생의 경우는 동점도가 다소 증가시켰다. Fig. 6의 더 낮은 온도인 115°C 동점도의 경우에도 EV가 재생바인더의 동점도를 신규 AP3 수준(1,032 cP) 정도로 낮추어주어 회생효과가 상당히 컸다. 특히 EV

0.7%에서 20% 재생의 경우 1,671cP를 62% 수준인 1,039cP로, 30% 재생의 경우 1,864cP에서 54% 수준인 1,004cP로 낮추어 그 효과가 가장 컸다. SA는 20% 재생바인더에서는 어느 정도(22% 저하) 효과를 보이거나 재생율이 높은 30%에서는 8.2% 저하로 효과가 미흡한 편으로 나타났다.

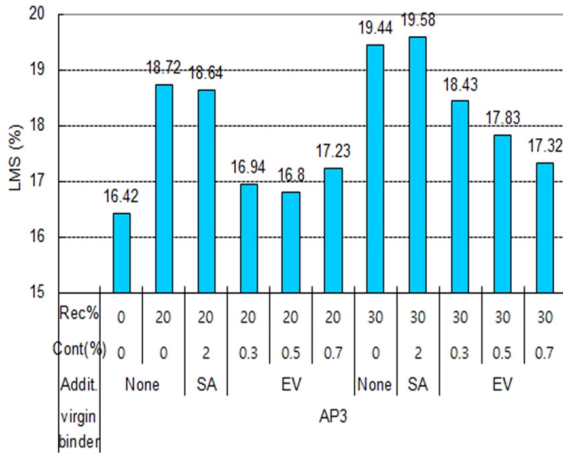


Fig. 3. Change of LMS due to WMA additive

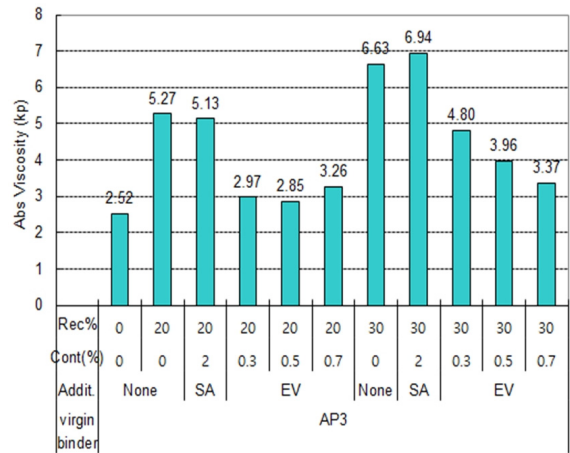


Fig. 4. Change of AV due to WMA additive

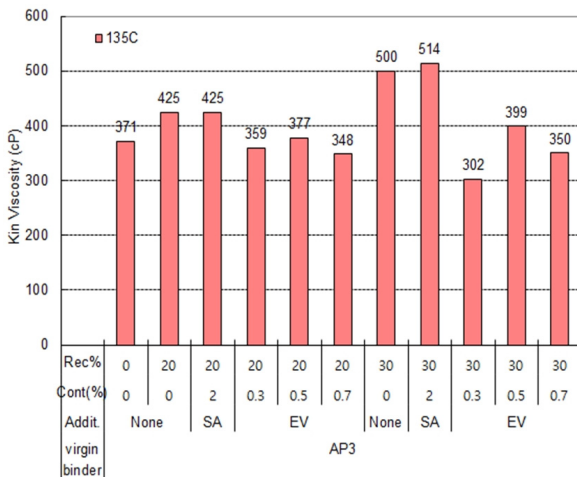


Fig. 5. Change of kin. viscosity due to WMA additive at 135°C

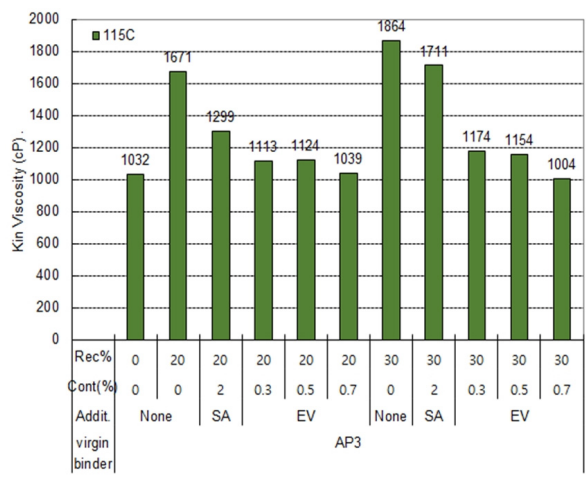


Fig. 6. Change of kin. viscosity due to WMA additive at 115°C

침입도의 경우(Fig. 7)도 동점도와 유사하게 SA는 효과가 미미한 반면 EV는 크게 효과를 보이며 특히 0.7%에서 바인더가 크게 물러지는 효과를 낼 수 있었다. 즉, 재생 20% 바인더의 41.7이던 침입도가 EV 0.7% 첨가로 64.4로 1.54배 물러졌으며, 재생 30%의 경우 침입도 35인 바인더가 58.8로 1.68배 물러지는 효과를 나타냈다.

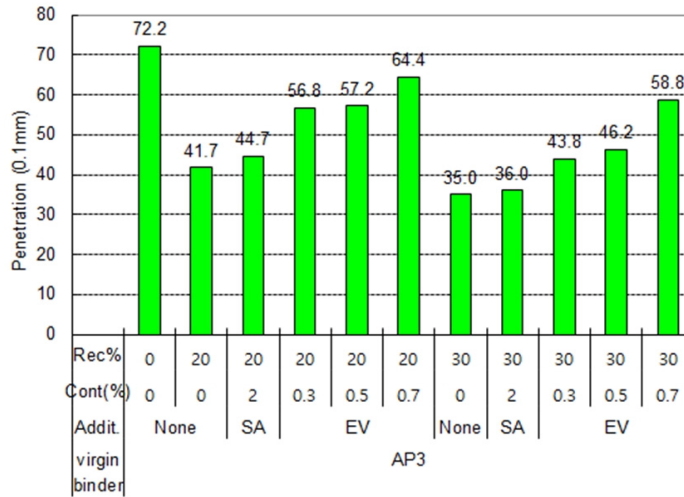


Fig. 7. Change of penetration due to WMA additives

이와 같이 EV의 사용은 일반혼합물(HMA) 생산 및 다짐온도보다 더 낮은 온도인 135°C와 115°C에서 0.7%의 경우 동점도를 AP3 Original 수준으로 낮추는 결과를 보여 EV를 사용할 경우 준고온으로 재생혼합물의 생산 및 다짐이 가능 할 것임을 보였다. 특히 사용된 RAP이 10년 이상(11.25년) 상당히 노화된 것임에도 EV의 사용이 재생첨가제 없이 효과를 보이므로, HMA 재생은 물론 WMA로의 30% 재활용에도 EV의 사용이 효과가 있을 것으로 추정된다. 그리고 필요시 EV의 함량을 더 높이는 것과 재활용 비율을 40% 등으로 높이는 것도 가능 할 수 있으나 혼합물이 물러질 염려가 있어서 소성변형저항성과 연관된 연구를 통해 결정해야 할 것으로 사료된다.

그러므로 본 연구 결과에 의하면 RAP 30% 재활용의 경우에 EV 0.7을 사용하는 것이 가장 효과적일 것이다. EV는 Emulsion 형태로 바인더를 묽게 하여 낮은 온도에서도 유동성을 좋게 하여 WMA 첨가제로 사용되는 것이나 화학적 구조는 알려지질 않아 그 구체적 원인을 알 수는 없다.

한편 LMS와 절대점도는 상관관계가 $R^2 \geq 0.94$ 수준으로 매우 높은 것으로 알려져 있으나, 동점도나 침입도와 어느 정도 낮기는 하지만 $R^2 \approx 0.7 \sim 0.8$ 수준으로 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다(Kim and Burati, 1993; Kim et al., 1995; Kim et al., 2015). 따라서 본 연구에 사용된 데이터로 각각의 상관관계를 회귀분석을 통해 추정 한 결과를 Figs. 8, 9에서 보여준다. 동점도의 경우 135°C에서와 더 낮은 온도인 115°C에서 LMS와 상관관계가 차이는 있으나 모두 $R^2 \geq 0.76$ 로 나타났고 침입도는 $R^2 \geq 0.89$ 로 나타나 선행연구와 유사한 결과를 보였다. 이를 통해 GPC시험으로 얻어진 LMS로부터 동점도와 침입도의 추정도 가능하며 그 신뢰도도 $R^2 = 0.89$ 수준으로 높을 것임을 추정할 수 있었다.

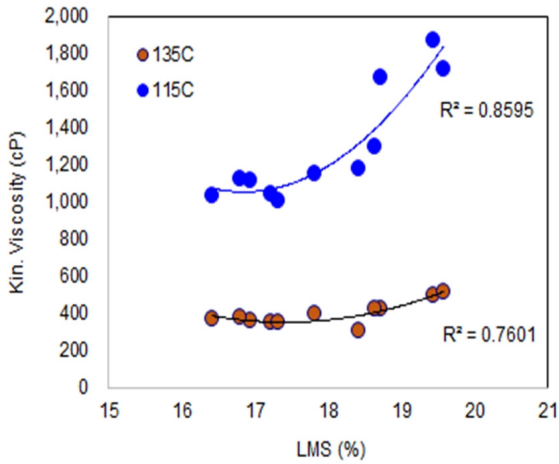


Fig. 8. Relation of kinematic viscosity and LMS

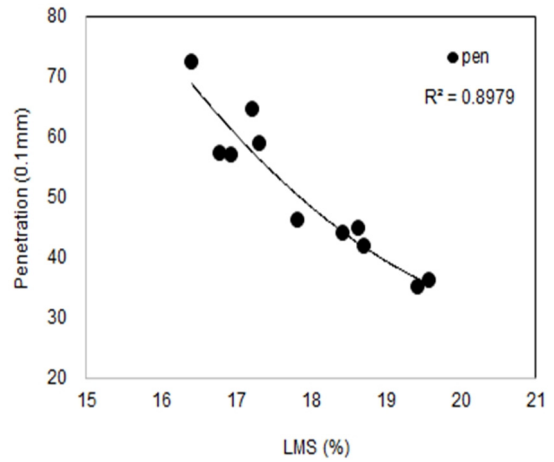


Fig. 9. Relation of penetration and LMS

4. 결론

본 연구는 RAP 재활용시 WMA 첨가제의 사용이 재생바인더를 회생시켜 준고온으로 재활용이 가능한지를 판단하기 위하여, 재생비율 20과 30%를 모사하여 RAP 추출·회수한 바인더를 AP3에 20%와 30% 첨가한 재생 바인더에 두 가지 준고온화 첨가제의 효과를 분석한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 준고온화 첨가제를 제시된 함량으로 첨가한 결과 에멀전 형태의 Evertherm(EV)은 재생바인더의 회생에 효과적이거나 입자형태의 Sasobit(SA)는 그렇지 못한 것으로 나타났다.
2. EV의 경우 첨가량에 따른 차이를 보이며 재생함량이 높을수록 EV의 첨가량이 높은 것에서 노화회생 효과를 내는 것으로 추정된다. 특히 RAP이 10년 이상 노화된 것임에도 재생첨가제 없이 점도 저하와 침입도의 증가 효과를 보이므로 EV의 사용이 재생첨가제와 유사한 효과가 있는 것으로 사료된다.
3. EV가 20, 30% 재생바인더의 절대점도, 동점도 및 침입도를 신규 AP3 수준으로 낮추는 효과를 보이므로, 이를 사용할 경우 가열재생은 물론 WMA 수준 온도에서의 재활용도 가능할 것으로 판단되었다.
4. 하지만 본 연구는 한정된 재료를 사용한 결과로서 그가능성을 추정한 실험적 연구이다. 그러므로 일반화된 결론을 얻기 위해서는 향후 보다 다양한 RAP과 신규바인더의 사용을 통한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재연구센터의 장비를 활용하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

- Baek, S.H., Kim, H.H., Doh, Y.S. and Kim, K.W. (2009). "Estimation of High-temperature properties of rubberized asphalt using chromatograph", *KSCE Journal of Civil Engineers*, 13(3), 161-167.
- Doh, Y.S., Kim, J.C., Yoo, M.Y. and Kim, K.W. (2010). "Evaluation of selected warm-mix additives for asphalt recycle", Paper presented at 2010 TRB Meeting, Washington, DC, Jan. 2010.
- Jennings, P.W. (1985). "Prediction of asphalt performance by HP-GPC", *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 54, 635-651.
- 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), 1993, 2, 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*, 7(1), 31-40.
- Kim, S., Lee, S.H., Kwon, O., Han, J.Y., Kim, Y.S. and Kim, K.W. (2016). "Estimation of service life reduction of asphalt pavement due to short-term ageing measured by GPC from of asphalt mixture", *Road Materials and Pavement Design*, 17(1), 153-167.
- Kim, S. Park, J. and Kim, K.W. (2011). "Correlation analyses for implementation of binder properties for rut-potential estimation of asphalt mixtures", *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM, 39(5), 858-867.
- 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 Special Publication, 152-161.
- Lee, S.J., Amirhanian, S. Park, N.W. and Kim, K.W. (2009). "Characterization of warm-mix asphalt binder containing artificially long-term aged binders", *Construction and Building Materials*, 23(6), 2371-2379.