

준고온 재생 아스팔트 콘크리트의 기본특성 평가

Evaluation of Fundamental Properties of Warm-mix Recycled Asphalt Concretes

| | |
|--------------------|--|
| 김 남 호 Namho Kim | 비회원 · 강원대학교 대학원 지역건설공학과 석사과정 |
| 김 진 철 Jin C. Kim | 정회원 · 다산이엔지 |
| 홍 준 표 Jun P. Hong | 정회원 · 강원대학교 대학원 지역건설공학과 박사과정 |
| 김 광 우 Kwang W. Kim | 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : asphalt@hanmail.net) |

ABSTRACT

This study evaluated strength properties of recycled asphalt concretes using warm-mix technology. Granite with maximum size of 13mm and penetration grade of 80-100 virgin binder were used for mixing in recycled mixtures. Mix design was performed using 20% and 30% RAP(coarse : fine= 6 : 4) contents. GPC, penetration, absolute viscosity and kinematic viscosity were measured for determining ratio of two warm-mix additives (Evotherm and Sasobit). Low-density polyethylene(LD) used as asphalt modifier for improving stiffness of recycled WMA mixtures in this study. Therefore, a total of 11 mixtures were prepared in this study; 8 warm-mix recycled mixtures(2 RAP contents × 2 warm-mix additives × 2 modifiers), 2 hot-mix recycled mixtures and 1 HMA virgin mixture(control). Deformation strength, indirect tensile strength, moisture sensitivity, permanent deformation by wheel tracking tests were measured out for evaluating fundamental properties of recycled asphalt concretes using warm-mix technology.

KEYWORDS

RAP(Reclaimed Asphalt Pavement), warm-mix asphalt, deformation strength, moisture sensitivity, permanent deformation

요지

본 연구는 준고온 공법을 이용한 재생 아스팔트 콘크리트의 강도특성을 평가하기 위해 이루어졌다. 굵은 골재 최대치수 13mm의 화강암과 침입도 60-80인 신규 바인더 60-80을 재생 혼합물을 제조하는데 사용하였다. 배합설계는 RAP(굵은 입자 : 잔입자=6 : 4) 첨가비율 20%와 30%를 사용하였고 GPC, 침입도, 절대점도, 동점도를 준고온 첨가제(Evotherm와 Sasobit)의 첨가 함량을 결정하기 위하여 측정하였다. LD(low-density poly ethylene)를 본 연구에서 준고온 재생 아스팔트 혼합물의 개질제로 사용하였다. 본 연구에서는 8개의 준고온 재생 혼합물(2 RAP함량 x 2 준고온 첨가제 x 2 개질제)뿐만 아니라 2개의 일반 재생 혼합물, 1개의 가열 혼합 일반혼합물(control)까지 총 11개의 혼합물을 제조하였다. 변형강도 시험, 간접인장강도 시험, 수분민감성 시험, wheel tracking을 통한 소성변형 시험을 준고온 재생혼합물의 기본 특성을 평가하기 위하여 수행하였다.

핵심용어

랩(회수 아스팔트 포장재료), 준고온 공법, 준고온 첨가제(Evotherm, Sasobit), 수분민감성, 소성변형

1. 서론

폐아스팔트 콘크리트의 재활용은 자원이 부족한 국내의 경우에 고부가가치의 자원을 재활용하는 측면에서 필수사항이라 할 수 있다. 특히 선진국에서는 환경적으로 안전한 방법으로서의 재활용 방안이 강구되고 있는 시점에 우리의 대응은 비교적 늦은 편이다.

2005년 2월에 발효된 교토기후협약은 국가 간의 온실가스의 저감을 위한 것으로 우리나라도 이를 대비한 여러 가지 대책 마련이 시급하다. 이에 전국적으로 5,000만톤 이상의 아스팔트 혼합물이 사용되는 포장 공사에 환경 친화적인 준고온 혼합 아스팔트(Warm mix asphalt: WMA) 포장공법의 보급이 시급하다(월간전기, 2008).

생산 및 시공시 이산화탄소 저감 및 화석연료의 절감을 위한 WMA 포장 기술은 신규 혼합물뿐만 아니라 재활용에도 적용이 가능하다. 따라서 WMA 기술을 적용한 국내에서의 회수 아스팔트 포장재료(Reclaimed asphalt pavement: RAP)의 재활용 기술 개발은 여러 가지로 의미가 있다. 그러므로 본 연구는 RAP을 준고온으로 재활용하기 위하여 준고온화 첨가제를 넣어 표층 포장 재료로 재활용하기 위한 기초연구이다.

현재 국내에서는 페아스팔트 콘크리트를 아스팔트 포장에 재활용하는 비율이 매우 낮으며 그나마도 RAP 굵은골재를 주로 사용한다. 따라서 기존의 연구는 주로 RAP 굵은골재만을 사용한 재생아스팔트 콘크리트의 기본 물성시험, 다양한 혼합 비율에 대한 배합설계 및 플랜트의 적정 혼합물의 제조 방법을 제시하고 있다. 하지만 RAP 중에서도 잔골재는 바인더 함량이 높은 재료이기 때문에 이를 사용하면 신규 바인더의 양을 획기적으로 줄일 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 RAP을 잔 입자와 굵은 입자로 구분하여 두 가지를 다 준고온으로 표층용 아스팔트 혼합물로 재활용하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구의 목적은 재활용 시에 체계적으로 사용되지 않던 RAP 잔골재를 사용하는 방안을 검토하고 또한 회수아스팔트 포장 재료를 준고온 기법으로의 재활용 가능성을 실험을 통해 확인하고 그 방안을 제시하는 것이다.

2. 재료 및 연구방법

2.1. 사용재료

본 연구에서는 수집된 RAP을 13mm체를 통과하고 4번체에 남은 굵은 입자와 4번체를 통과한 잔입자로 구분 준비하였다. 신규 골재는 화강암 쇄석(Granite) 굵은 입자, 화강암 부순 모래 잔골재(Screenings), 석회석 분말 채움재(Mineral filler)를 사용하였다. 굵은 골재의 최대치수는 13mm, 잔골재는 No. 8체 이하의 screenings 이다. 재활용에 사용된 신규 아스팔트는 S사의 침입도 등급 80~100이다. 비교용으로 제조한 신규혼합물용 아스팔트는 침입도 60-80이다. 또한 개질제로는 융점이 낮은 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene: LD)을 사용하였다.

기존의 외국에서 만들어진 준고온화 첨가제의 종류는 다양하고 지금도 지속적인 연구를 통해 개발이 되고 있다. 그 중에 본 연구에 사용된 것은 세계적으로 널리 사용되는 Wax계의 Sasobit(SA)과 Emulsion계의 Evotherm(EV)이다. SA는 원형 알갱이 형태로도 제조되어 다루기가 안전하고 상온에서 반응을 일으키지 않는다. 녹는점은 110~115℃이고 습식 및 건식 혼합이 용이하여 혼합물 믹싱 및 현장 시공시의 아스팔트 바인더의 흐름을 증진시켜주는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

EV는 혼합물 제조시의 온도를 100°F(약 56℃)정도 낮추어

주는 것으로 알려져 있다. 따라서 플랜트의 에너지 사용량을 55% 절약할 수가 있고 CO₂와 SO₂의 배출량을 45% 줄이는 결과가 보고되었다. 또한 HMA 플랜트 내에서 그대로 사용할 수 있으며 골재 코팅 향상 및 워커빌리티와 다짐 효과 증진을 가져 오는 것으로 알려져 있다. 그림 1은 사용된 SA와 EV를 보여주고 있다(Warm ..., 2008).



그림 1. (a) Sasobit and (b) Evotherm

2.2. 시험방법

2.2.1. RAP의 추출 및 회생, 회수 바인더의 시험

RAP의 추출(Extraction)과 회생(Recovery), 회수 바인더(Recovered binder)와 관련된 시험(GPC시험, 침입도시험, 동점도시험, 절대점도시험)은 선행 연구(김진철 등, 2009)를 통해 얻어진 결과를 참고하여 사용하였고 약간의 추가적인 시험을 통해 결과 값을 수정·보완하였다.

2.2.2. RAP 함량 및 바인더

외국 문헌 등에서 제시하는 RAP의 적정 사용 범위는 전체 혼합물에 중량비로 10~70%이지만 일반적인 배치 플랜트의 경우는 최대 50%까지 사용할 수 있다. 첨가제의 개발을 통해 100% 재생기법도 연구되었으나(허정도 2009), RAP을 사전 가열하는 보조장치가 없이는 10~35%가 가장 적절한 비율로 보고 있다(Asphalt ..., 1996).

본 연구에서는 아스팔트재활용에 미분을 활용하기 위하여 RAP 굵은 입자와 잔입자의 비율 6 : 4로 하여 총 RAP 첨가비율 20, 30%을 사용하였다. 재생혼합물 제조용으로 사용되는 RAP은 사용 전 오븐에서 1시간 약 150℃로 예열을 한 후 135℃로 준고온 재생 혼합물에 사용되었다. 비교용으로 RAP을 첨가하지 않고 신규골재만으로도 가열혼합아스팔트(Hot-mix asphalt: HMA) 배합설계를 하였고 RAP을 20, 30% 사용하여 재생 HMA 배합설계를 160℃에서 Asphalt Institute의 매뉴얼 MS-20(Asphalt... 1996)에 의하여 수행하였다.

혼합골재의 개략적인 아스팔트 소요량은 MS-20의 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$P_b = 0.035a + 0.045b + K_c + F \quad (1)$$

여기서, P_b = 전체 혼합물 중량에서 개략적인 아스팔트의 비율(%), a = No.8체에 남은 골재의 중량비(%), b = No.8체에 통과하고 #200체에 남은 비율(%), c = No.200체를 통과한 골재(채움재)의 중량(%), K_c = c 값이 11~15%일 경우 0.15 사용, 6~10%일 경우 0.18 사용, 5% 이하인 경우 0.20 사용을 하고 F = 0~2%로써 자료가 없을 경우 0.7~1.5% 사용한다. 이는 비중이 2.6~2.7인 보통 골재 경우에 근거한 값으로 상기에 사용되는 %는 모두 정수를 사용한다(Asphalt... 1996).

재활용 혼합물에 첨가할 새로운 아스팔트 양은 앞에서 결정된 아스팔트량에서 RAP에 포함된 아스팔트 양을 제외한 것으로 그 식은 (2)와 같다.

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}} \quad (2)$$

여기서, P_{nb} = 재활용 혼합물 내에 신규 아스팔트의 비율(%), r = 재활용 혼합물 내에 신규 골재의 비율(%), P_b = 전체 혼합물 중량에서 아스팔트의 비율(%), P_{sb} = RAP의 아스팔트의 비율(%)로서 상기에 사용되는 %는 모두 정수를 사용한다.

식 (3)은 전체 아스팔트 함량에 대한 추가 아스팔트 양의 비율(R)을 계산하는 식이다.

$$R = 100 \frac{P_{nb}}{P_b} \quad (3)$$

2.2.3. 신규 바인더의 선정

그림 2를 이용하여 RAP으로부터 추출·회수된 노화 아스팔

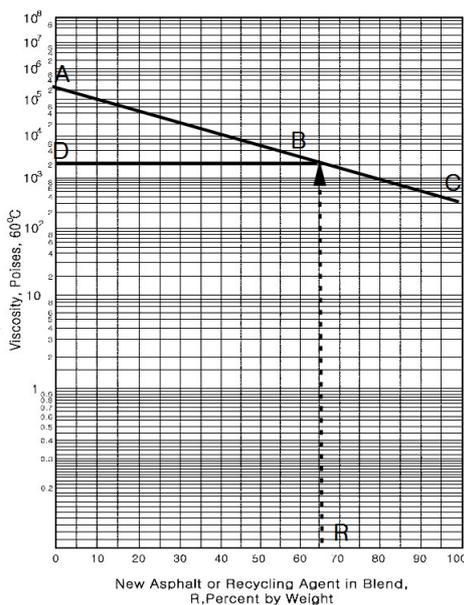


그림 2. Asphalt viscosity blending chart

트의 점도를 좌측 축에 점 A로 나타내었다. 혼합 아스팔트의 목표 점도를 좌측 세로축에 나타낸다(Asphalt..., 1996). 일반적인 목표 점도는 해당 범위의 중간으로 한다. 예를 들어 60-80의 경우 점도의 중간인 2,000poise를 취한다.

신규아스팔트 양은 $(P_{nb} / P_b \times 100)$ 으로 가로축에 표시하고 이 점에서 수직선을 긋고 목표 점도를 나타내는 수평선과 만나는 점 B를 결정한다. 점 A와 B를 잇는 직선을 그어 우측 세로축과 만나는 C점에 해당되는 점도가 신규 아스팔트의 점도이다.

만일 C점이 약 2,000이면 60-80을, 약 1,000이면 80-100, 약 500이면 100-120을 사용하고 250 이하로 내려가면 재생첨가제(Rejuvenator)를 사용하거나 RAP의 재활용 비율을 낮추어야 한다.

2.2.4. 재생혼합물 제조

본 연구에서는 재생혼합물 내에서 보다 균등하게 노화 바인더의 점도를 회복시키는 방법을 사용하였다. 이 방법은 재생혼합물 제조시 RAP과 신규바인더를 넣고 30초간 1차 비빈 후 가열된 신규골재를 투입하고 30초 단계적 비빔(stage mixing)을 하는 것이다(Kim et al. 2007). 따라서 20, 30% 재생혼합물 배합설계에 이 방법을 사용하였다. 신규재료로 HMA 표층용 밀입도 아스팔트 혼합물(control)도 제조하였다.

준고온 첨가제로 사용된 SA와 EV는 가열된 바인더에 각각 습식방법으로 첨가하였다. 준고온 재생혼합물의 개질을 위하여 LD를 전체 바인더량의 4%를 건식방법으로 첨가하였다. 이는 기존의 연구에서 우수한 소성변형 저항성을 나타내는 LD 함량이다(김진철 등 2009, 이학일 등 2008).

최적 아스팔트 함량(Optimum asphalt content: OAC) 결정을 위하여 현재 국토해양부 지침에 제시된 가열아스팔트 혼합물 배합설계 방법을 적용하였다. 혼합시 바인더의 온도는 160℃, 신규골재의 온도는 HMA의 180℃보다 30℃ 낮은 150℃로 가열하였다. RAP은 혼합 전 1시간 동안 150℃ 오븐에 넣어 사전 가열하였다. 믹싱 된 재생 혼합물은 135℃에서 2시간 단기노화 처리를 하였다. 배합설계는 아스팔트 함량을 4.0%~6.0%까지 0.5%씩 5단계로 변화시켜 가며 SG(Superpave gyratory compactor)로 100회 다짐하였다("아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침"(2009)). 배합설계 변수로는 공극률 3~5%, 변형강도(S_D) 4.25MPa 이상, 골재간극률(VMA) 14% 이상, 그리고 포화도(VFA) 70~85%를 OAC의 결정기준으로 적용하였다. 이 모든 기준을 만족하는 아스팔트 함량 중에서는 공극률 4%가 얻어지는 아스팔트 함량을 OAC로 결정하였다.

2.2.5. 혼합물의 역학적 특성 시험

변형강도(Deformation strength : S_D)는 소성변형과 상관

성이 높은 것으로 확인되어 한국형 배합설계의 중요한 강도 값으로 국토해양부 지침에 포함된(Kim Test) 특성 치이다. 그림 3과 같이 공시체를 거치하고 60℃ 수중에서 30분 수침한 공시체에 30mm/min 속도로 정하중을 가하였다. S_D 는 그림 4의 곡선에서 최대 하중(P)과 이 때의 수직 변형(y)을 읽어 식 (4)로 계산하였다.

$$S_D = \frac{0.32P}{(10 - \sqrt{20y - y^2})^2} \quad (4)$$

여기서, S_D = 변형강도(MPa), P = 최대하중(N), y = 수직 변형 값(mm)이다.

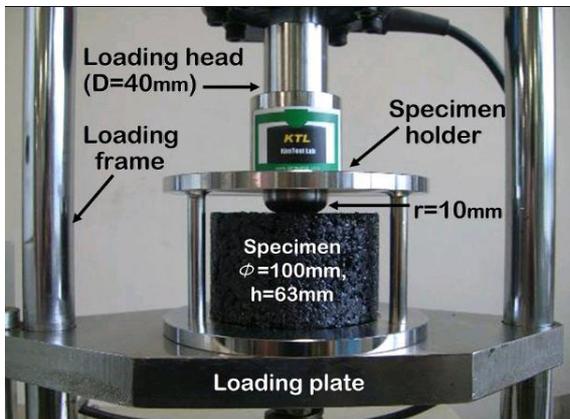


그림 3. Kim Test setting

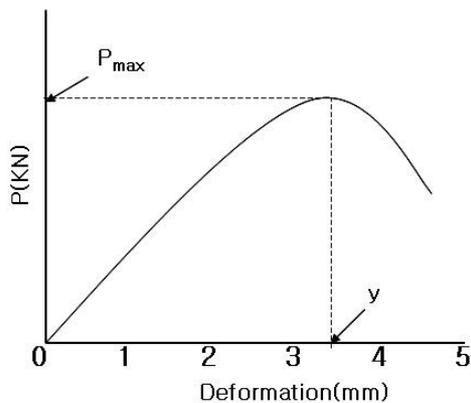


그림 4. A typical load-deformation curve from Kim Test

간접인장강도(Indirect tensile strength: ITS)는 25℃에서 직경 100mm인 선회다짐 공시체를 사용하였다(그림 5). 공시체 반경과 같은 곡률의 오목한 면을 가진 폭 12.5mm의 금속 하중띠를 통해 50mm/mim의 속도로 하중을 가하여 식 (5)로 계산하였다.



그림 5. Photograph showing ITS test

$$ITS = \frac{2,000P}{\pi D t} \quad (5)$$

여기서, ITS = 간접인장강도(kPa), P = 최대하중(N), t = 공시체의 두께(mm), D = 공시체의 지름(mm)이다.

아스팔트 혼합물은 물이 침투하면 역학적 특성이 저하된다. 이는 골재의 아스팔트 피막이 벗겨지는 박리현상에 기인한다. 또한 물을 포함한 혼합물이 동결하면 공극내의 수분팽창으로 내부응력을 유발하고, 이로 인해 미세균열이 발생되어 강도가 저하된다. 본 연구에서의 동결융해 처리 방법은 ASTM D 4867/D4867M-04을 사용하여 공극률 7±1%인 공시체 6개를 제작하여 3개는 무처리, 나머지 3개는 부분 포화 후 랩으로 싸서 동결융해 처리하였다. 동결융해 1 사이클은 25℃ 공시체를 1시간 동안 -18℃로 하강시켜 23시간 유지한 후 꺼내어 60℃ 물에서 22시간 동안 수침하는 것이다. 간접인장강도(ITS)는 60℃ 물에서 꺼내어 1시간 동안 25℃ 수침 후 측정하였다. 또한 건조 공시체의 ITS는 20분 동안 25±1℃수조에 넣었다 꺼내어 측정하였다. 얻어진 두 ITS 값으로 식 (6)의 인장강도비(Tensile strength ratio: TSR (%))를 구하였다.

$$TSR(\%) = \frac{\text{동결융해 처리공시체 인장강도}}{\text{건조공시체 인장강도}} \times 100 \quad (6)$$

본 연구에서는 반복주행(Wheel Tracking: WT) 시험을 위해 305×305×50mm 슬래브 공시체를 롤러 다짐기로 4±0.5%의 공극률이 되도록 제조하였다. 슬래브용 준고온 혼합물도 원형공시체용 혼합물과 마찬가지로 135℃에서 2시간 단기노화를 시킨 후 제조하였다. 공시체는 24시간 상온 양생 후 60℃에서 6시간

보관 후 같은 온도로 시험에 사용되었다. 윗하중 압력은 100psi(700kPa)이며 왕복 40cycle/min로 1.5시간(5,400sec) 동안 총 3,600cycle 반복주행에 따른 침하깊이를 측정하였다. 바퀴의 재질은 강재이며 직경 200mm, 폭은 50mm이고 왕복거리 200mm이고 WT 시험기 내부는 그림 6과 같다.



그림 6. Wheel tracking test system

혼합물별 동적안정도(Dynamic stability: DS)를 WT 시험을 통하여 구하였다. 반복재하에 따른 누적 침하율은 그림 7과 같이 기울기로 나타내게 되는데 초기점인 500, 중앙점인 1,800 및 종점인 3,600cycle의 기울기의 역수(m_i)를 취해서 더한 값을 사용하였다. 이는 기존 KS 방법의 최종단계의 동적안정도만 취하는 모순을 개선하기 위하여 개발 한 것이다(김광우 등 2006). 그림 7과 식 (7)는 본 연구에서 사용된 동적안정도의 산출 방법을 보여준다.

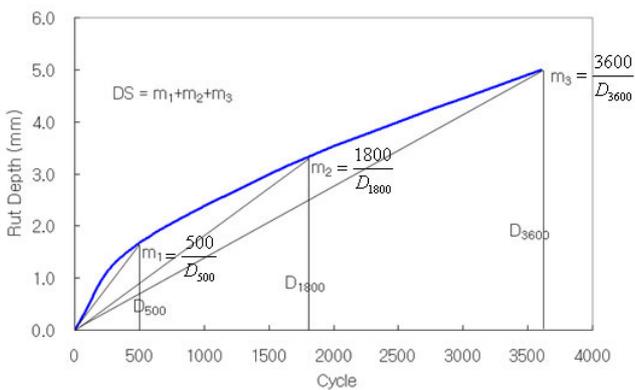


그림 7. Illustration of dynamic stability (DS) in a WT curve (김광우 등, 2006)

$$DS_{new}(\text{pass} / \text{mm}) = 2(m_1 + m_2 + m_3) = 2 \left[\frac{500}{D_{500}} + \frac{1,800}{D_{1,800}} + \frac{3,600}{D_{3,600}} \right] \quad (7)$$

여기서, DS_{new} = 동적안정도(pass/mm), D_{500} = 500cycle에서의 침하깊이(mm), D_{1800} = 1,800cycle에서의 침하깊이(mm), D_{3600} = 3,600cycle에서의 침하깊이(mm)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. RAP의 특성 및 신규 바인더 등급

표 1은 RAP 바인더의 기본 특성을 나타내고 있다. RAP 바인더는 침입도나 점도 상으로 비교적 노화가 심한 재료는 아닌 것으로 나타났다.

표 1. Properties of RAP binders and Virgin asphalt

| Binder | AP Contents (%) | Pen. (0.1mm) | Kinematic viscosity(cp) | AVS (ps) | LMS (%) |
|--------------|-----------------|--------------|-------------------------|----------|---------|
| RAP (Coarse) | 3.60 | 27 | 2342 | 20,098 | 22.9 |
| RAP (Fine) | 7.54 | 16 | 3725 | 21,476 | 23.64 |
| 80-100 | - | 71 | 371 | 1,685 | 16.4 |
| 60-80 | - | 64 | 412 | 2,431 | 17.5 |

그림 8은 RAP 20%와 30%로부터 추출된 골재와 신규골재인 화강암의 합성입도를 나타낸다. 입도는 국토해양부 표준용 13R(WC-6)로 중교통량 도로의 표준에 사용되며 내유동성이 우수하며 소성변형의 가능성이 높은 지역에 사용되는 혼합물의 입도이다.

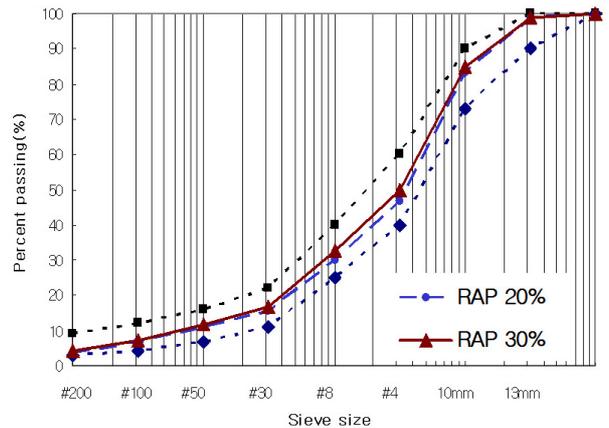


그림 8. Gradation curves of combined aggregates (Granite, RAP)

식 (1)을 통해 골재 혼합시 필요한 아스팔트 양을 RAP 20% 재활용에 대하여 추정하였다. 여기서 RAP 굵은 입자와 잔입자의 아스팔트 함량이 3.6%, 7.54%이므로 이를 6:4로 혼합한 RAP의 아스팔트함량은 55.2%이었다.

No.8체에 남은 골재의 중량비 (a)는 69.80, No.8~No.200

체에 남은 골재의 중량비 (b)는 26.24, No.200체를 통과하는 골재의 중량비 (c)는 3.97이었고 K는 0.20, F는 1.1이었다. 따라서 식 (1)에 의해 아래와 같이 개략적 소요 아스팔트 량을 5.5%로 결정하였다.

$$\begin{aligned} P_b &= 0.035a + 0.045b + K_c + F \\ &= 0.034 \times 70 + 0.045 \times 26 + 0.18 \times 4 + 1.1 \\ &= 5.5(\%) \end{aligned}$$

RAP의 아스팔트 함량(P_{sb})은 5.2%이고, RAP의 사용비율 (r)은 20%이므로 식 (2)에 의하여 혼합물에 필요한 추가 아스팔트의 비율(P_{nb})은,

$$\begin{aligned} P_{nb} &= \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_b} \\ P_{nb} &= \frac{(100^2 - 80 \times 5)6}{100(100 - 5)} - \frac{(100 - 80)5}{100 - 5} = 5.0\% \end{aligned}$$

식 (3)을 이용하여 전체 아스팔트량에 대한 추가 아스팔트 함량의 비율(R)을 계산하였다.

$$R = 100 \frac{P_{nb}}{P_b} = \frac{100 \times 5.0}{5.5} = 90.9(\%)$$

재생혼합물의 목표점도는 비교용 신규혼합물에 사용하는 아스팔트인 60-80 점도의 중간인 2,000ps(점 D)로 설정하였다. 그림 9에서 R값인 90.9%를 가로축에 표시하여 그 수직 선과 목표점도 2,000ps에서 그 수평선이 만나는 점 B를 결정하였다. 그리고 노화아스팔트의 점도 21,500ps를 좌측세로축에 점 A로 나타내어 점 A와 B를 잇는 직선을 그어 우측 세로축과 만나는 점 C를 결정하였다. 따라서 추가 아스팔트의 점도 C는 약 1,100ps이었다. 이는 80-100의 점도와 유사하므로 80-100을 신규아스팔트로 사용하였다.

또한, 식 (1)을 이용하여 30% 재활용시의 소요 아스팔트 량을 추정하였다. (a)는 67.36, (b)는 28.57, (c)는 4.07이었다. 그리고 K는 0.20, F는 1.1이므로 개략적 소요 아스팔트 함량을 5.6%로 결정하였다.

RAP의 아스팔트 함량(P_{sb})은 4.5%이고, RAP의 사용비율 (r)은 30%이므로 식 (2)에 의하여 혼합물에 필요한 추가 아스팔트의 비율(P_{nb})을 4.5%로 결정하였으며 식 (3)을 이용하여 전체 아스팔트 함량에 대한 추가 아스팔트 함량의 비율(R)을 80.4%로 계산하였다. 따라서 목표 점도를 2,000ps(점 D)로 설정하고 R 값 80.4%와 RAP의 노화아스팔트 점도 21,500ps로부터 추가할 아스팔트의 점도가 1,000ps 이하였

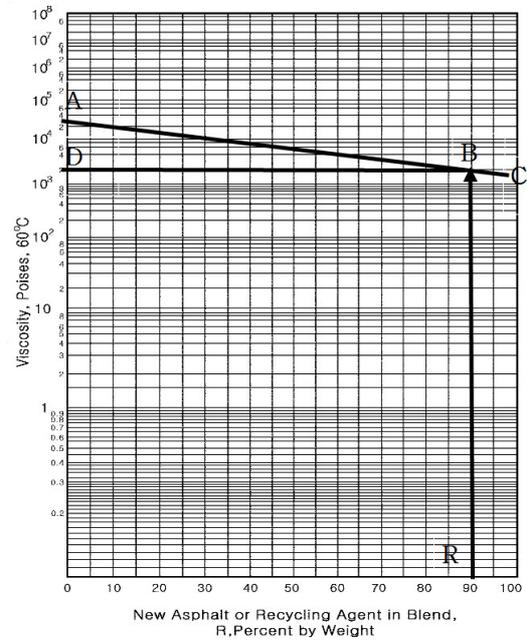


그림 9. Illustration of selection of virgin binder viscosity using asphalt viscosity blending chart(RAP 20%)

다. 하지만 준고온 첨가제를 첨가하면 점도가 낮아지므로(Doh et al, 2010) 신규 바인더를 80-100을 사용하였다.

3.2. 준고온화 첨가제의 첨가비율 선정

80-100의 바인더를 RAP로부터 추출한 회수바인더와 8:2와 7:3의 비율로 혼합하여 GPC, 침입도, 동점도 시험에 사용하였다. 절대점도는 GPC시험을 통해 식 (8)을 이용하여 구하였다. 이 식을 이용한 절대점도와 LMS의 회귀분석 분석에서 $R^2 > 0.95$ 를 나타낸다(Kim et al. 2006).

$$y = 13.082e^{0.3204x} \quad (8)$$

여기서, y 는 절대점도(p)이고 x 는 LMS 값이다.

표 2는 8:2(20%)와 7:3(30%)으로 신규바인더와 회수바인더를 혼합한 바인더의 시험 값이다. 준고온 혼합물의 추정 작업온도인 115°C 동점도를 위주로 비교해보면, RAP 20%에 WMA 첨가제를 넣지 않은 NONE일 경우 1671cp에서 EV 0.5는 1124로 33%, SA 2.0은 1299로 22% 낮아지는 효과를 보였다. RAP 30% NONE은 1864에서 EV 0.7은 1004로 46% 크게 낮아졌으나 SA 2.0은 8% 낮아지는데 그쳤다. 이와 같이 EV는 노화 바인더가 20-30% 첨가된 재생바인더의 동점도를 115°C에서 상당히 낮추었으나 SA의 경우 30% 재생에서는 효과가 적었다. 그리고 이를 토대로 EV는 RAP 20%에서는 0.5%, 30%에서는 0.7%를, SA는 동점도 값이 가장 낮은 2.0%를 RAP 20%, 30%에 사용하였다.

표 2. Binder properties by the ratio of WMA additives to recovered asphalt

| Vir. binder | RAP (%) | WMA additive cont. (%) | LMS (%) | AVS (kps) | Kinematic viscosity(cp) | | | pen. (0.1mm) |
|-------------|---------|------------------------|---------|-----------|-------------------------|------|------|--------------|
| | | | | | 115℃ | 125℃ | 135℃ | |
| 80-100 | 0 | 80-100 | 16.42 | 2.52 | 1032 | 596 | 371 | 72.2 |
| | 20 | NONE | 18.72 | 5.27 | 1671 | 945 | 425 | 41.7 |
| | | SA 1.0 | - | - | 1420 | 785 | 471 | 44.7 |
| | | SA 1.5 | - | - | 1342 | 760 | 440 | 42.0 |
| | | SA 2.0 | 18.64 | 5.13 | 1299 | 697 | 425 | 44.7 |
| | | EV 0.3 | 16.94 | 2.97 | 1113 | 595 | 359 | 56.8 |
| | | EV 0.5 | 16.80 | 2.85 | 1124 | 632 | 377 | 57.2 |
| | | EV 0.7 | 17.23 | 3.26 | 1039 | 575 | 348 | 64.4 |
| | 30 | NONE | 19.44 | 6.63 | 1864 | 1192 | 500 | 35.0 |
| | | SA 1.0 | - | - | 1803 | 936 | 584 | 36.0 |
| | | SA 1.5 | - | - | 1756 | 898 | 542 | 31.7 |
| | | SA 2.0 | 19.58 | 6.94 | 1711 | 874 | 514 | 36.0 |
| | | EV 0.3 | 18.43 | 4.80 | 1174 | 655 | 329 | 43.8 |
| | | EV 0.5 | 17.83 | 3.96 | 1154 | 650 | 399 | 46.2 |
| | | EV 0.7 | 17.32 | 3.37 | 1004 | 579 | 350 | 58.8 |

3.3. 배합설계

RAP 첨가량 2가지(20%, 30%), 준고온 첨가제 함량 2가지(20% 재생시 EV 0.5%, SA 2%, 30% 재생시 EV 0.7%, SA 2%), 개질제 유무(none, LD 4%)에 따른 8가지[2재생비율×2첨가제×2개질제] 준고온(WMA) 재생혼합물의 배합설계를 수행하였다. 또한, 비교용(control)으로 60-80 신규 HMA 혼합물과 RAP 20%, 30% 첨가한 HMA 혼합물을 160℃에서

표 3. Mixture designation and description

| Rap ratio(%) | Mix type | Designation | Description |
|--------------|----------|-------------|---|
| 0 | HMA | R00 | Granite dense grade, HMA, RAP 0% |
| 20 | HMA | R20 | Granite dense grade, HMA, RAP 20% |
| | WMA | R20E05 | Granite dense grade, WMA, RAP 20%, Evotherm 0.5% |
| | | R20E05L4 | Granite dense grade, WMA, RAP 20%, Evotherm 0.5%, LD 4% |
| | | R20S20 | Granite dense grade, WMA, RAP 20%, Sasobit 2.0% |
| | | R20S20L4 | Granite dense grade, WMA, RAP 20%, Sasobit 2.0%, LD 4% |
| 30 | HMA | R30 | Granite dense grade, HMA, RAP 30% |
| | WMA | R30E07 | Granite dense grade, WMA, RAP 30%, Evotherm 0.5% |
| | | R30E07L4 | Granite dense grade, WMA, RAP 30%, Evotherm 0.7%, LD 4% |
| | | R30S20 | Granite dense grade, WMA, RAP 30%, Sasobit 2.0% |
| | | R30S20L4 | Granite dense grade, WMA, RAP 30%, Sasobit 2.0%, LD 4% |

표 4. Optimum asphalt content(OAC) and proportion of each mixture

| Rap ratio (%) | Mix type | Designation | OAC (%) | RAP (%) | Virgin materials | | |
|---------------|----------|-------------|---------|---------|------------------|---------------|------------|
| | | | | | 13mm (%) | Fine Agg. (%) | Filler (%) |
| 0 | HMA | R00 | 5.3 | 0 | 48 | 48 | 4 |
| 20 | HMA | R20 | 5.0 | 20 | 48 | 28 | 4 |
| | WMA | R20E05 | 4.8 | 20 | 48 | 28 | 4 |
| | | R20E05L4 | 4.5 | 20 | 48 | 28 | 4 |
| | | R20S20 | 4.4 | 20 | 48 | 28 | 4 |
| | | R20S20L4 | 5.1 | 20 | 48 | 28 | 4 |
| 30 | HMA | R30 | 5.0 | 30 | 42 | 24 | 4 |
| | WMA | R30E07 | 4.5 | 30 | 42 | 24 | 4 |
| | | R30E07L4 | 4.4 | 30 | 42 | 24 | 4 |
| | | R30S20 | 5.0 | 30 | 42 | 24 | 4 |
| | | R30S20L4 | 4.3 | 30 | 42 | 24 | 4 |

1시간 단기노화하여 배합설계를 수행하였다.

표 3은 시험에 사용된 혼합물에 대한 구분설명이다. 표층용 13mm 밀입도에 맞게 조정된 혼합입도와 배합설계를 통한 OAC는 표 4와 같다. 배합설계 결과 일정하지는 않으나 WMA 첨가제와 폴리머의 사용이 OAC를 다소 낮추는 것으로 나타났다. 이는 WMA 첨가제가 바인더를 다소 묽게 하고, LD도 용점이 110℃로 낮아 작업성을 좋게하기 때문인 것으로 추정된다.

3.4. 준고온 재생 혼합물의 역학적 특성

(1) 준고온 재생 혼합물의 변형강도(S_D) 특성

배합설계로부터 결정된 OAC로 각 혼합물별 공시체를 제작하여 S_D 시험을 수행하였다. 표 5와 같이 배합설계 기준 공극 3~5%, VMA 14% 이상, VFA 70~85%를 모두 만족하였다.

표 5. Deformation strength(S_D) of each mixture at OAC

| Rap ratio (%) | Mix type | Designation | OAC (%) | Air void (%) | VMA (%) | VFA (%) | P (kN) | y (mm) | S_D (MPa) |
|---------------|----------|-------------|---------|--------------|---------|---------|--------|--------|-------------|
| 0 | HMA | R00 | 5.3 | 3.56 | 15.78 | 77.47 | 2980 | 2.0 | 3.47 |
| 20 | HMA | R20 | 5.0 | 3.88 | 15.37 | 74.76 | 3507 | 3.1 | 3.77 |
| | WMA | R20E05 | 4.8 | 3.67 | 14.76 | 75.11 | 3278 | 2.2 | 3.97 |
| | | R20E05L4 | 4.5 | 4.42 | 14.75 | 70.04 | 3370 | 2.9 | 3.69 |
| | | R20S20 | 4.4 | 3.81 | 14.02 | 72.83 | 4537 | 2.8 | 5.07 |
| | | R20S20L4 | 5.1 | 4.00 | 15.61 | 74.36 | 2956 | 2.7 | 3.33 |
| 30 | HMA | R30 | 5.0 | 4.36 | 15.84 | 72.47 | 4029 | 3.4 | 4.20 |
| | WMA | R30E07 | 4.5 | 3.86 | 14.33 | 73.05 | 4763 | 3.2 | 5.08 |
| | | R30E07L4 | 4.4 | 4.01 | 14.17 | 71.68 | 3761 | 2.9 | 4.10 |
| | | R30S20 | 5.0 | 3.58 | 15.13 | 76.35 | 3743 | 3.2 | 4.00 |
| | | R30S20L4 | 4.3 | 4.08 | 14.01 | 70.87 | 4510 | 2.9 | 4.95 |

하지만 변형강도(S_D)는 상당수의 혼합물이 중교통량의 간선 도로포장 기준인 4.25MPa에 미치지 못하였다. 가장 높은 S_D 는 RAP 20%에서는 R20S20로 5.07MPa이었고 30%에서는 R30E07로 5.08MPa이었다. 일부 혼합물에서 다소차이가 있으나 20% WMA 혼합물 4가지의 S_D 평균은 4.02, 30% WMA 혼합물 4가지의 S_D 평균은 4.53으로 30% 재생혼합물이 더 높았다.

모든 혼합물의 S_D 는 일반 도로포장의 기준인 3.2MPa를 만족하였다. 이는 준고온 재생 혼합물이 어느 정도는 변형강도를 확보하나 HMA보다는 다소 못하며 개질에 따른 효과도 변동성이 커 보인다. 이는 RAP 품질의 변동성과 준고온 혼합물의 다짐특성이 HMA와 다르기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 준고온 재생 아스팔트 혼합물은 추후의 연구를 통해 다짐특성 분석 및 적절한 횡수 결정이 필요할 것으로 생각된다.

(2) 준고온 재생 혼합물의 간접인장강도(ITS) 특성

표 6은 재생혼합물의 ITS 특성을 나타내고 있다. 시험결과 20% 재생혼합물은 Control인 R00과 비슷한 수준이었으나 30% 경우에는 큰 수치를 나타내었다. 그리고 R30E07L4를 제외하고 개질제를 첨가한 재생 혼합물이 높은 ITS를 나타냈다. 재생 비율로 보면 20%보다는 30%의 ITS값이 높았다. 이는 일반적으로 재생 혼합물내의 RAP 바인더가 완전히 회생되지 못하여 높은 강성을 유지하고 있어 신규 혼합물보다는 RAP의 첨가가, 또한 RAP이 많이 들어갈수록 높은 S_D 및 인장강도를 얻는 것이라고 판단된다.

하지만 같은 RAP 함량에서는 개질제를 사용한 것을 제외하고는 WMA 혼합물이 HMA의 값보다 더 높지 않게 나타난 것은 HMA와 유사한 점도복원 효과가 있었기 때문인 것으로 판단된다. 이를 통해 바인더의 투입온도는 같은 160℃이지만 준고온 재생혼합물은 온도가 30℃ 낮음에도 RAP의 노화 바인더를 HMA와 유사하게 복원해 낸 것으로 추정할 수 있다.

표 6. ITS properties of each mixture at OAC

| Rap ratio (%) | Mix type | Designation | OAC (%) | Air void (%) | VFA (%) | ITS (KPa) |
|---------------|----------|-------------|---------|--------------|---------|-----------|
| 0 | HMA | R00 | 5.3 | 3.52 | 77.63 | 902 |
| 20 | HMA | R20 | 5.0 | 3.76 | 75.35 | 890 |
| | WMA | R20E05 | 4.8 | 4.13 | 72.78 | 882 |
| | | R20E05L4 | 4.5 | 4.22 | 70.57 | 960 |
| | | R20S20 | 4.4 | 4.39 | 72.42 | 875 |
| | | R20S20L4 | 5.1 | 3.28 | 77.74 | 1037 |
| 30 | HMA | R30 | 5.0 | 3.15 | 78.71 | 1207 |
| | WMA | R30E07 | 4.5 | 4.21 | 72.55 | 1262 |
| | | R30E07L4 | 4.4 | 4.22 | 70.62 | 1102 |
| | | R30S20 | 5.0 | 3.62 | 76.15 | 1058 |
| | | R30S20L4 | 4.3 | 4.30 | 72.81 | 1344 |

(3) 준고온 재생 혼합물의 수분민감성

동결융해(Freeze/thaw: F/T)시험으로 수분민감성 평가를 수행하였다. 표 7은 20분 25℃에 수침(wetted)한 공시체와 박리방지제로 소석회(hydrated lime)를 첨가하지 않고 F/T 처리한 공시체와 박리방지제를 첨가하고 동결융해(F/T+Lime) 처리한 공시체의 RAP 비율에 따른 ITS 결과이다. 그림 10은 표 7을 도식화한 것이다.

표 7. Moisture sensitivity of WMA mixture at OAC

| Rap ratio (%) | Mix type | Designation | Lime (%) | ITS (kPa) | | TSR (%) ②/①×100 | | |
|---------------|----------|-------------|----------|-----------|-------|--------------------|------|-------|
| | | | | Wetted ① | F-T ② | | | |
| 0 | HMA | R00 | 0 | 697 | 524 | 75.2 | | |
| | HMA | R20 | 0 | 805 | 673 | 83.6 | | |
| 20 | WMA | R20E05 | 0 | 971 | 787 | 81.0 | | |
| | | | 0.5 | - | 781 | 80.4 | | |
| | | R20E05L4 | 0 | 1039 | 900 | 86.6 | | |
| | | | 0.5 | - | 954 | 91.7 | | |
| | | R20S20 | 0 | 930 | 882 | 94.9 | | |
| | | | 0.5 | - | 886 | 95.3 | | |
| | | R20S20L4 | 0 | 885 | 781 | 88.2 | | |
| | | | 0.5 | - | 861 | 97.3 | | |
| | | 30 | WMA | R30E07 | 0 | 937 | 900 | 96.1 |
| | | | | | 0.5 | - | 1055 | 101.9 |
| R30E07L4 | 0 | | | 1087 | 1026 | 94.4 | | |
| | 0.5 | | | - | 1047 | 96.4 | | |
| R30S20 | 0 | | | 921 | 834 | 90.6 | | |
| | 0.5 | | | - | 889 | 96.6 | | |
| R30S20L4 | 0 | | | 1082 | 862 | 79.7 | | |
| | 0.5 | | | - | 937 | 86.6 | | |

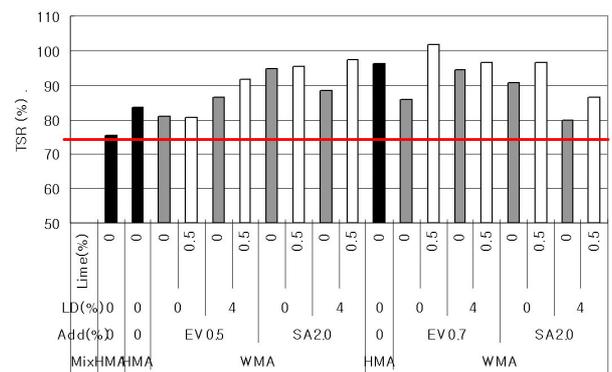


그림 10. Tensile strength ratio of various mixture combinations

Control로 제작된 60-80의 혼합물(R00)이 재생 혼합물보다 크게 ITS값이 낮았다. 박리방지제를 첨가한 것은 첨가하지 않은 것보다 ITS가 높게 나타나 대부분 수분민감성이 향상된

것으로 판단된다. 하지만 그 차이는 크지 않았고 이는 소석회 무첨가 TSR 수치가 높은 것이 원인으로 판단된다. 한편 RAP 이 첨가된 재생 혼합물의 경우 전부 ITS와 TSR이 향상되었는데 이는 예상하지 못한 결과이다. 일반적으로 재생 혼합물은 TSR이 좋지 못한 것으로 알려져 있는데 본 연구 결과는 그와 상반된 것이다. 또한 준고온 혼합물의 TSR도 비교적 낮은 편이나 이 역시 본 연구에서는 기존의 연구 결과들보다 높게 나타나 이에 대한 연구가 추후에 있어야 할 것으로 사료된다.

(4) 준고온 재생 혼합물의 소성변형 저항 특성

반복주행(Wheel Tracking: WT) 시험은 혼합물의 소성변형 저항을 평가하는 가장 일반적인 시험이다. WT 시험은 동적 재하 시험으로 Slab 공시체를 제조 24시간 뒤 물성측정 후 반으로 잘라 2회 시험하고 평균을 분석에 사용하였다. 표 8은 WT 시험의 결과인 침하깊이와 동적안정도를, 그림 11은 이를 한 눈에 볼 수 있도록 그래프로 나타내었다.

표 8. Result of wheel tracking test

| Rap ratio (%) | Mix type | Designation | Rut depth(mm) | | | DSnew (pass/mm) |
|---------------|----------|-------------|---------------|-------|-------|-----------------|
| | | | D500 | D1800 | D3600 | |
| 0 | HMA | R00 | 2.35 | 3.81 | 4.87 | 2867 |
| | HMA | R20 | 1.35 | 2.17 | 2.73 | 5059 |
| 20 | WMA | R20E05 | 1.43 | 2.04 | 2.48 | 5416 |
| | | R20E05L4 | 1.59 | 2.11 | 2.47 | 5424 |
| | | R20S20 | 1.30 | 1.71 | 2.07 | 6385 |
| | | R20S20L4 | 1.38 | 2.25 | 3.09 | 4759 |
| 30 | WMA | R30E07 | 1.07 | 1.73 | 2.08 | 6498 |
| | | R30E07L4 | 1.58 | 2.34 | 3.07 | 4595 |
| | | R30S20 | 1.40 | 1.98 | 2.35 | 5652 |
| | | R30S20L4 | 1.16 | 1.96 | 2.4 | 5712 |
| | | | 1.09 | 1.53 | 1.76 | 7388 |

D₃₆₀₀ = Final rut depth

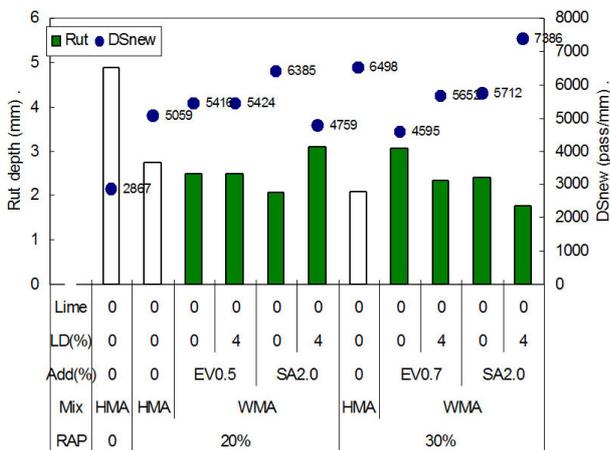


그림 11. Rut resistance of various mixture combinations

Control인 R00보다 모든 재생혼합물의 최종침하깊이 (D₃₆₀₀)는 낮고 동적안정도는 높았다. 이는 RAP 첨가로 혼합물의 강성이 증가하여 변형에 대한 저항성이 더 크게 나타나기 때문인 것으로 추정된다. 같은 RAP 함량 내에서 보면 20%의 경우 한 가지 (R20S20L4)를 제외하고 HMA보다 WMA가 낮았다. 반면 30%에서는 같은 R20S20L4을 제외하고는 반대로 모두 더 침하되어 상반된 결과를 보였다. 이를 통해 WMA 첨가제의 사용이 소성변형 저항성에 일정한 영향을 보이지는 않는 것으로 판단되었다.

또한, LD의 첨가에 따른 최종 침하 깊이의 비교는 R20S20L4를 제외하고는 모든 혼합물의 침하가 적었다. 그리고 최종 침하깊이는 20% 첨가시에 R20S20이 가장 낮았고 30% 첨가시에 R30S20L4이 가장 낮았다. 하지만 RAP 첨가 비율 20%와 30%간에는 큰 차이를 보이지 않았다. 표 8의 Rut Depth에서의 수치는 실제로 실험된 Slab 공시체를 육안 관찰시 구별이 되지 않을 정도의 값이고 동적안정도의 경우 모든 재생 혼합물이 R00보다 컸다.

4. 결론

본 연구에서는 준고온 공법을 이용하여 제조한 재생 아스팔트 혼합물에 대한 기초연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재생혼합물의 변형강도(S_D)는 신규혼합물보다 높으나 재생 혼합물간에는 RAP 20%보다 30% 첨가가 높았다. 하지만 제조된 일부 준고온 재생혼합물에서는 LD 첨가가 효과를 나타내지 못하였다.
2. 간접인장강도(ITS)의 경우도 S_D와 마찬가지로 신규 혼합물보다 재생혼합물에서 높은 값을 보였다. 하지만 S_D와 달리 LD 첨가는 대부분 혼합물에서 ITS 향상 효과가 나타났다.
3. 수분민감성 시험에서는 준고온 재생 혼합물이 신규 혼합물보다 TSR이 크게 높았다. 또한, 박리방지제를 첨가한 공시체가 첨가하지 않은 공시체에 비해 TSR이 대부분 높아 효과가 나타났다.
4. 재생 혼합물의 반복주행(WT) 시험 결과 신규 혼합물보다는 준고온 재생혼합물의 동적안정도가 모두 높게 나왔다. RAP 함량에 따른 침하깊이는 20%와 30%에서 별다른 차이를 보이지 않았다. 반면에 LD의 첨가는 일부 혼합물을 제외하고 소성변형 저항성이 향상되는 결과를 얻었다.
5. 주로 폐기되는 RAP 잔입자를 일정비율 재활용이 가능함을 확인하였으나 준고온 공법을 이용한 재생아스팔트 혼합물은 가열 혼합물과 다짐특성이 달랐다. 그러므로 향후 준고온 재생혼합물의 다짐 특성과 다짐 회수에 관한 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합건설신소재연구소의 지원 및 장비를 활용하여 이루어진 것이다.

참고 문헌

- “가열아스팔트 혼합물의 배합설계 지침”, (1998), 아스팔트 포장연구회, 도서출판 정보나라.
- 김광우, 도영수, (2006), “아스팔트 혼합물 반복주행 시험에서 합리적 동적안정도의 산정 방법”, *한국도로학회 논문집* 8(1), 77~87.
- 김진철 (2010), “준고온 공법을 이용한 재생 아스팔트 콘크리트의 소성변형 특성 및 수분민감성 연구”, 강원대학교 대학원 석사학위 논문.
- 김진철, 유민용, 김현환, 김광우 (2009), “아스팔트 재생시 준고온화 첨가제의 회생효과 분석”, *한국도로학회 학술대회 논문집*, 151~156.
- “아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침” (2009), 국토해양부.
- 월간전기 (2008), “기획연재: 기후변화 협약에 따른 산업동향과 대응방안②”, 전우문화사 2008. 3.
- 이학일, 김현환, 박남원, 김광우 (2008), “특정 개질아스팔트 혼합물의 노화, 균열 및 변형 특성”, *한국도로학회 논문집*, 10(2), 205~219
- 허정도 (2009), “페아스콘 100% 재활용을 위한 신기술 개발”, *한국도로학회 학술대회논문집*, 583~586
- “Asphalt hot-mix recycling.” (1996) The Asphalt Institute Manual series, 20 (MS-20).

- ASTM D4867 / D4867M - 09 *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*, ASTM, 2009.
- 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.
- Kim, K. W., Amirhanian, S. N., Doh, Y. S., and Jung, J. H.(2007), “Reducing stiffness of oxidized binder in recycled mixture by stage mixing.”, *Journal of AAPT*, Vol. 78.
- Kim, K. W., Kim, K. A., Doh, Y. S. and Amirhanian, S. N., “Estimation of RAP's binder viscosity using GPC without binder recovery”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 18(4), July/August, 2006, 561-567.
- La, I., Ryu, M. Y., Kim, H. H., Ahn, K., Doh, Y. S., and Kim, K. W.(2009), “Fundamental property evaluation of styrene monomer modified warm-mix asphalt concrete”, *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, 7th Int'l RILEM sympo.* 619~626.
- “Recycling hot-mix asphalt pavements”, (1996), Information series 123, NAPA.
- “Warm Mix Asphalt The Future of Flexible Pavements”, (2008) 12th Annual Minnesota Pavement Conference St. Paul, MN Feb.

접 수 일 : 2010. 9. 1
심 사 일 : 2010. 9. 12
심사완료일 : 2010. 12. 1