

현장 중온 재생 혼합물용 재생첨가제의 기초적인 연구

A Fundamental Study of Rejuvenator for Warm in Place Recycling Asphalt Pavement Mixtures

박재영	Park, JaeYoung	정회원 · 전북대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : 0709hjyp@naver.com)
이강훈	Lee, Kanghun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 전임연구원 (E-mail : kh83lee@kict.re.kr)
권수안	Kwon, SooAhn	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 선임연구위원 (E-mail : sakwon@kict.re.kr)
이재준	Lee, JaeJun	정회원 · 전북대학교 토목공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : lee2012@jbnu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This research was a laboratory study for evaluating the Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) mixture added developed rejuvenator for warm mix recycling. Waste asphalt mixtures occupy about 18.2% of construction wastes in Korea. Moreover, most rejuvenators were imported from Europe or the U.S. Therefore, improving usage of RAP with a developed rejuvenator material provides environmental protection at a reduced cost.

METHODS : The specimen used for this experiment was performed by only using RAP. A suitable rejuvenator for Target PG was then added. In addition, a conventional rejuvenator was selected to compare performance and specimens introduced with the same procedure as the developed rejuvenator was prepared. In order to evaluate rutting resistance and water susceptibility, we conducted a deformation strength test, a tensile strength ratio test, and a dynamic immersion test with the prepared mixtures.

RESULTS : Laboratory test results indicated that both the developed additive and conventional additive improved performance of the recycled asphalt mixtures compared to mixtures without the rejuvenator. In addition, the deformation strength test and TSR test results satisfied standards for domestic recycling asphalt mixtures. The dynamic immersion test showed that the developed rejuvenator has superior scaling resistance than the conventional rejuvenator.

CONCLUSIONS : In terms of rutting resistance and moisture susceptibility, the warm mix recycled asphalt mixtures with the developed rejuvenator appeared to effectively recovered performance.

Keywords

RAP, rejuvenator, warm mix recycling, deformation strength test, TSR test, dynamic immersion test

Corresponding Author : Lee, Jaejun, Associate Professor
Department of Civil Engineering, Chonbuk National University,
567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Chonbuk, 54896, Korea
Tel : +82.63.270.2427 Fax : +82.63.270.2421
E-mail : lee2012@jbnu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Mar. 16, 2017 Revised Sep. 21, 2017 Accepted Sep. 22, 2017

1. 서론

우리나라는 국토면적이 좁아 골재와 같은 천연자원의 공급은 매우 한정적이다. 사회기반시설 중 하나인 도로

의 건설은 대량의 골재를 소모하여 자원의 고갈을 초래하며 산림 복구의 어려움이 수반되기도 한다. 또한, 환경부 자료에 따르면 2014년도 총 폐기물 발생량(지정폐

기물 제외)은 388,486(톤/일)이며 건설폐기물은 전체의 47.7%(185,382톤)을 차지한다고 발표하였다. 건설폐기물은 2009년 이후로 계속 감소세를 보이지만 그 중 폐아스팔트가 18.2%로 상당한 비중을 차지하고 있다. 네덜란드, 일본과 같은 선진국에서는 아스팔트 순환골재를 70% 이상 사용하는데 현재 국내의 경우는 그에 미치지 못하는 실정이다. 사용되지 않는 폐아스팔트 골재는 기층용 재료로 사용되거나 매립하게 되며, 이에 따른 운반비용의 발생, 수질오염 등의 문제를 야기할 수 있다. 정부에서는 아스팔트 순환골재(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)의 의무사용을 정하고 순환골재의 사용용도 및 의무사용량에 관한 고시를 하였으며, 2020년까지 선진국 수준으로 높여나갈 계획이다(An, et al., 2016). 또한 2015년에 체결된 파리협정에서 우리나라도 2030년까지 온실가스를 37% 감축하기로 결정하였다. 현재 사용되고 있는 가열 아스팔트(HMA)는 시공시에 고온가열로 인한 연료의 고소비, 이로 인한 유해가스 배출 등의 문제가 지적되고 있다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로 중온현장가열재생공법(Warm in-place)을 제시할 수 있다. 중온현장가열재생공법은 Hot in-place와 같이 기존에 건설되어 있는 노후화된 포장체를 가열 밀링하여 재생 첨가제와 함께 Re-mixing하여 전량 재시공하는 공법이며, 중온화 재생첨가제를 투입하여 추가적으로 아스팔트 바인더의 점도를 낮추어 가열 및 시공 온도를 20~30℃ 가량 낮추어 신규골재 및 역청재료 사용을 절감할 수 있는 이점과 더불어 고온가열에서의 환경부하 저감을 통해 국가의 친환경 정책에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 국내에서 사용되고 있는 재생첨가제의 경우 대부분 미국이나 유럽에서 수입에 의존하고 있는 실정이며, 제품의 단가 또한 매우 높다는 단점이 있어 재생첨가제의 개발은 현장 재활용 공법을 통한 도로 유지보수 시장의 활성화에 이바지할 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 국내에서 개발 중에 있는 중온화 재생첨가제의 성능을 평가하기 위하여 재생첨가제 투입 전·후 동적전단레오미터(DSR) 실험을 수행하여 각각의 PG 등급에 필요한 첨가량 산정을 토대로 재생 아스팔트 혼합물을 제작하여 동적수침 실험, 인장강도비 실험 및 변형강도 실험을 수행하였다.

2. 문헌고찰

2.1. 국내 기술동향

Kwon 외 4인(2013)은 국내 현장가열재생아스팔트 시공 혼합물 평가를 위하여 일반국도 21호선 덕썩우기 포장 현장에서 포설 직전의 현장 가열 재생아스팔트 혼합물을 회수하여 실내실험을 수행하였다. 실내 시험으로는 필트랙킹 시험, 간접인장강도, 수분저항성 실험, 마찰안정도 시험을 진행하였으며, 현장에 시공된 포장체의 코어를 채취하여 간접인장강도와 마찰안정도를 측정하였다. 실험 결과, 소성변형 저항성을 알아보기 위한 동적안정도 측정결과 일반 가열아스팔트 혼합물 기준에 만족하였으며, 혼합물의 믹싱시간이 증가함에 따라 동적안정도 값이 증가하고 결과값의 분포폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 마찰안정도와 간접인장강도 결과는 모두 국내 GR F 4005에서 제시하고 있는 품질기준에 만족하는 양호한 성능을 가지고 있음을 제시하고 있다. 또한 수분민감도 실험에서 모두 국내 기준을 만족하는 결과값을 얻을 수 있었다. Remixing 혼합물의 경우 간접인장강도값 증가로 인하여 TSR값이 다소 감소하는 경향을 보였지만 현장가열재생아스팔트 혼합물도 수분저항성이 양호함을 알 수 있었다.

Kim 외 3인(2007)은 재생첨가제에 의한 폐아스팔트의 공용 특성에 관한 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 침입도를 기준으로 하는 바인더의 물성평가방법을 통하여 얻은 기준과 PG 등급을 만족시키는 재생첨가제의 첨가량과의 상관성에 대하여 검토하였으며, 국내에서 생산된 S社의 AP 5를 RTFO 및 PAV 시험장비를 이용하여 노화시킨 후 실험을 진행하였다. 실험결과, PAV를 2회 진행시켜 최장기노화시킨 바인더의 경우 침입도에 의한 재생방법이 점도나 PG 등급보다 10% 이상 더 많은 양의 재생첨가제를 필요로 하였으며, 폐아스팔트 바인더만을 재생첨가제로 신규 아스팔트 바인더만큼의 물성을 얻고자 할 경우 국내에서 사용되어지고 있는 재생첨가제 비율은 약간 과소평가가 되었음을 언급하였다.

2.2. 해외 기술동향

현장가열재생공법은 열을 가하여 포장체 표면을 연화시킨 후 포장 표면을 기계적으로 걷어내어 재생첨가제, 신규골재 또는 재생첨가제와 함께 혼합하여 재포장하는 공법을 말한다. 현장가열재생공법은 도로 표층부에 1~2인치 정도의 균열이 발생한 도로의 유지보수에 효과적이며(공정 개선이나 균열의 종류에 따라 3인치까지 가능), 러팅, 라벨링, 미끄럼저항 감소 및 저온균열 등이 발생한 도로의 성능 개선에 효과적이다. 다만 기층이 구조적으로 안정된 경우에만 시공 가능하다는 점에 유의

하여야 한다(State of California, 2008).

현장가열재생공법은 기존의 아스팔트 포장체를 신설 포장체와 유사하게 복원 또는 수정하는 것을 목표로 한다. 포장층 내부의 역청재료는 공기중 산화에 노출되어 있으며, 실질적으로 표면으로부터 15mm~20mm 깊이에서 영향을 받는다. 산화는 바인더의 경화의 원인으로 노면의 균열로 이어진다. 현장가열재생공법은 재생첨가제를 사용하여 노화된 바인더의 점도를 초기 상태로 회복시키는데 사용된다. 따라서 포장체의 구조적 결점을 포함한 다른 결점이 없는 경우에 재생첨가제와 바인더가 아스팔트 포장체의 수명을 연장할 수 있다(Department of Transport and Main Roads, 2012).

Rogers, William.(2011)는 RAP가 다량 첨가된 아스팔트 혼합물 내에서 중온화 첨가제의 영향을 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 혼합물은 세 가지 종류의 RAP를 각각의 함량(0%, 20%, 35%, and 50%)에 맞게 투입하고, 일반 Hot mix asphalt(HMA), zeolite 및 Sasobit을 투입한 경우로 변수를 두어 제작하였다. 실험 시편은 HMA 및 제안된 WMA 가열온도에 맞게 제작하였으며 소성변형, 간접인장강도, 인장강도비 및 피로수명에 대한 시험을 진행하였다. 연구결과, 각각의 RAP 투입 조건에서 Zeolite는 HMA보다 불리한 성능을 보일 것으로 보여진다. Sasobit의 경우 HMA와 동등하거나 그 이상의 성능을 갖는 것으로 나타났다.

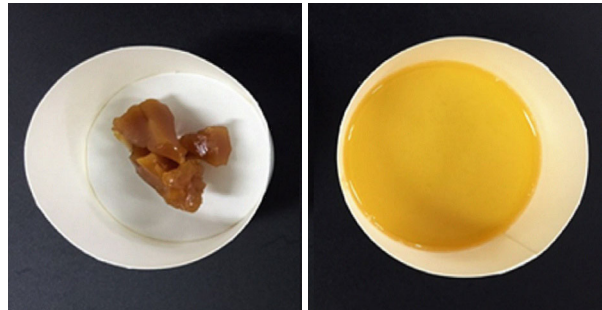
문헌조사 결과, 중온 아스팔트와 RAP 재활용에 대한 연구결과가 활발히 진행되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 고비율 순환골재 중온 재생공법에서 요구되는 순환골재 사용 및 중온화 기술이 결합된 연구결과는 발표된 경우가 매우 드물었다. 국내에서 배포한 '건설폐자재 재활용 도로 포장 지침', 'GR F 4005, 재활용 가열 아스팔트 혼합물'에서도 고비율 순환골재를 활용한 중온 재생 아스팔트 혼합물에 대한 내용을 수록하고 있지 않아 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 RAP를 100% 사용한 중온 재생 혼합물의 품질을 평가하여 중온 현장가열재생공법에 대한 적용 가능성을 평가하고자 한다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1. 중온화 재생첨가제

아스팔트 바인더는 공용기간 중에 산소와 반응하여 아로마틱 성분은 감소되고 아스팔텐 및 레진 함량은 증가하게 된다. 이는 포장체의 강성을 증가시키는 원인이

되며 초기의 점탄성 거동을 방해하게 된다. 재생첨가제는 공용기간 중에 노화가 발생된 아스팔트 바인더에 연성과 점성을 회복시켜 신규바인더와 유사하게 거동하도록 성질을 회복시키는 재료이다.



(a) Conventional Rejuvenator (b) Developed Rejuvenator

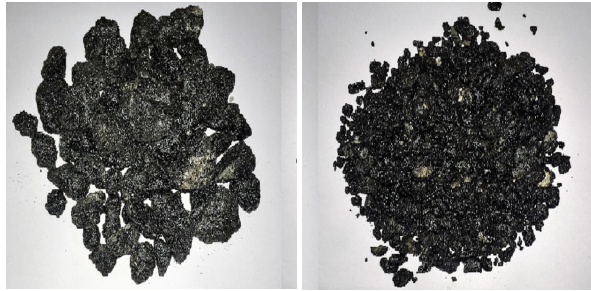
Fig. 1 Rejuvenator for Warm Mix Recycling

본 연구에서 사용된 중온화 재생첨가제는 사슬구조의 아마이드계 박리방지제와 중온화 시공을 위한 Soybean Oil을 혼합한 첨가제이다. 아스팔트 바인더는 탄소사슬이 긴 소수성을 가지고 있기 때문에 첨가제의 소수성 사슬 부분과 결합하게 된다. 또한 국내 아스팔트 혼합물 생산에 사용되는 골재는 주로 규산염으로 구성되어 있으며, 규산염 골재의 표면은 Si-O²⁻의 약한 음전하를 띄므로, 양전하를 갖는 질소화합물이 정전기적 결합을 유도하기 적합하다. 결과적으로, 소수성인 아스팔트 바인더와 친수성인 골재 사이에서 부착을 도와 박리 저항성을 향상시킬 수 있다. 중온화 재생첨가제는 유증기 또는 다량의 CO₂를 발생시키는 현장가열재생공법의 단점을 20~30℃ 낮은 혼합 및 시공온도를 통하여 개선하여 환경부하를 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 개발한 재생첨가제의 비교군으로는 현장에서 사용되고 있는 재생첨가제를 선정하였다.

3.2. RAP 골재

아스팔트 혼합물은 잔골재, 굵은골재, 채움재를 포함한 골재와 아스팔트 바인더로 이루어져 있으며, 구성재료의 물리·화학적 특성들은 포장체의 거동과 밀접한 연관성이 있다. 아스팔트 포장체는 시간이 지남에 따라 산소 및 수분과 반응하여 체적 내의 바인더의 노화가 진행된다. 노화된 바인더는 강성이 증가되어 포장체의 강도를 증가시키지만 연성이 감소하여 균열이나 취성과파괴의 원인이 된다. 위와 같은 특성을 보이는 포장체를 재사용하기 위해서는 신규 바인더 또는 재생첨가제의 투입을 통하여 노화로 인하여 감소된 연성 및 점성을 회복시켜

소요 강도에 부합하는 혼합물로 회복시킬 수 있다. 국토교통부에서 제시한 ‘아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침’에 따르면 아스팔트 순환골재는 생산되는 혼합물에 균일한 입도의 아스팔트 순환골재가 재료분리 없이 적정 비율로 투입될 수 있게 분급하여야 하며, 일반적으로 13mm 이하의 2단계로 나뉘어 언급하였다. 본 연구에서 사용된 골재는 슬래브 형태의 포장체를 가열하여 Fig. 2와 같이 8mm체로 굵은골재, 잔골재로 분류하여 사용하였다.



(a) Course Aggregate (b) Fine Aggregate

Fig. 2 RAP

3.3. 첨가제 투입에 따른 고온특성 변화

노화 진행 과정에서 포장체의 강성 및 취성의 증가는 고온 PG의 상승을 의미한다. 강성이 증가한 노화 바인더는 재생첨가제의 투입량에 따라 연성을 회복하게 되며 동적전단레오미터(DSR) 및 절대점도 시험을 통하여 고온에서의 물성 변화를 파악할 수 있다. DSR 실험은 바인더의 전단계수($|G^*|$)와 위상각(ϕ)을 지역의 온도조건 및 하중각속도 조건에서 측정하는 실험으로서, 온도와 노화 정도에 따라서 최소 또는 최대 기준값을 만족하는 바인더는 해당 지역 또는 온도에 적합한 것으로 판정한다. DSR 실험은 10rad/sec의 각속도에서 $|G^*|/\sin\phi$ 값을 통하여 평가하게 된다(Yun, et al., 2012). 절대점도는 60°C에서 30기압의 흐름에 대한 액체의 저항성을 나타내는 재료의 물리적 성질로, 국토교통부에서 재생 아스팔트 혼합물의 배합설계 시 재생 아스팔트 바인더의 물성평가 기준을 칩입도 기준에서 절대점도 기준으로 전환하였다. ‘아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침’에 따르면 재생 아스팔트 설계 시 절대점도는 현재 국내에서 일반적으로 사용되는 아스팔트의 노화 전 상태의 절대점도인 2,000poise를 사용한다고 명시하였다. 또한 미국에서는 점도 기준을 이용하던 과거의 방법에서 DSR 시험을 이용한 방법으로 재생 아스팔트 혼합물의 바인더 선정기준을 교체하여 사용하고 있다. 본 연구에서 사용된 RAP 노화 바인더와 중온화 재생첨가제가 첨가된 아스팔트 바인더의 동적전단

레오미터(DSR) 실험 결과는 다음 Table 1과 같으며 $|G^*|/\sin\phi$ 값이 1.0kPa일 때의 온도를 고온등급으로 설정하였다.

Table 1. Dynamic Shear Rheometer Test Result

	Temperature (°C)	Binder type	
		RAP binder (Non-rejuvenator)	RAP binder + 10% rejuvenator
$G^*/\sin\phi$ (kPa)	94	0.26	0.05
	88	0.46	0.07
	82	0.87	0.11
	76	1.75	0.18
	70	3.73	0.32
	64	8.14	0.59
	58	18.08	1.13

DSR 실험 결과를 토대로 목표 PG에 도달하기 위한 첨가량을 결정하였으며, 선행 연구결과에서 발표한 첨가량에 따른 절대점도 시험 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Rejuvenator Content and Absolute Viscosity Test Value to Reach Target PG (Jeong, et al., 2016)

Target PG (°C)	RAP binder (%)	Rejuvenator contents (%)	Absolute viscosity (Poise)
PG 64	92.1	7.9	1,963
PG 70	94.9	5.1	4,690
PG 76	97.6	2.4	10,866

3.4. 아스팔트 혼합물 평가

재생첨가제가 첨가된 재생아스팔트 혼합물을 평가하기 위하여 마샬 시험방법에 따른 공시체를 제작하였으며 이론밀도와 실측밀도를 측정할 결과 공극률, 골재간극률 및 포화도가 표층용 아스팔트 혼합물 기준범위를 통과함을 확인하였다. 제작된 공시체는 평가기준에 따라서 실험을 진행하였다.

3.4.1. 변형강도

변형강도 실험은 아스팔트 포장체의 소성변형 저항성에 대한 거동을 예측하기 위한 실험이다. 소성변형 저항성에 대한 실험방법은 과정이 매우 간편한 마샬안정도 실험과 실제 차륜을 모사하여 동적하중을 가하는 휠트랙킹(Wheel-Tracking) 실험이 대표적이다. 그러나, 마샬안정도 실험의 경우에는 축방향 하중을 가하지 않아 골재의 배열과 다르게 하중이 작용하게 되며(Kim,

et al., 2004), 휠트랙킹 실험의 경우에는 공시체 제작에 많은 양의 혼합물이 소요되며 고가의 장비를 필요로 한다. Kim 외 3인의 연구결과에 따르면 55~65℃의 온도에서 변형강도 값과 휠트랙킹 실험을 통하여 얻을 수 있는 총침하량 및 동적안정도 결과는 매우 유사한 거동을 보임을 알 수 있었다.

변형강도는 마샬 다짐 공시체를 60℃의 항온수조에서 30분간 수침 후 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 직경 4cm의 하중봉을 사용하여 30mm/min의 축방향 하중을 가하게 된다. 여기에서 파괴 시까지의 최대하중과 변위를 구하고, Eq. (1)을 이용하여 변형강도를 산출할 수 있다.

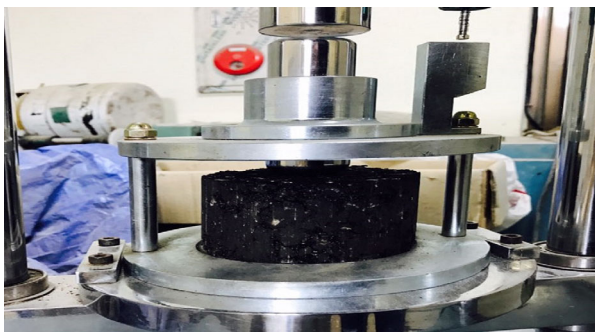


Fig. 3 Test for Measuring Deformation Strength

$$S_d = \frac{0.32P}{(10 + \sqrt{20y - y^2})^2} \quad (1)$$

S_d : 변형강도, P : 최대하중, y : 최대변위

3.4.2. 인장강도비(TSR) 실험

아스팔트 혼합물은 보통 수분과의 접촉시에 강도의 저하가 발생하게 된다. 수분은 공용기간 중에 자연적 현상으로 인하여 포장체 내부로 침투하게 되어 골재와 골재 사이의 접착력을 손상시킨다. 또한 겨울철에는 포장체 내부로 침투한 수분이 동결융해 과정에 의해 팽창수축을 반복하게 되며 이에 따라 결합력이 저하된다. 위와 같은 수분손상은 러팅이나 포트홀 등의 파손을 유발한다. 본 연구에서는 첨가제 투입량에 따른 수분저항성의 경향을 평가하기 위하여 'KS F 2398, 아스팔트 혼합물의 수분저항성 시험 방법'에 따라서 진행하였다. 공시체는 공극률이 $7 \pm 0.5\%$ 가 되도록 다짐횟수를 조정하여 제작하였으며 동결과정은 생략하였다. 수분처리 공시체는 이론최대밀도 시험기를 이용하여 강제포화 후 60℃의 항온수조에서 24시간 수침시키고 2시간동안 25℃의 수조에 양생하여 간접인장강도 실험을 수행하였으며 기

준공시체는 25℃의 항온수조에 수분이 침투하지 않도록 하여 2시간 동안 양생 후 간접인장강도 실험을 수행하였다.

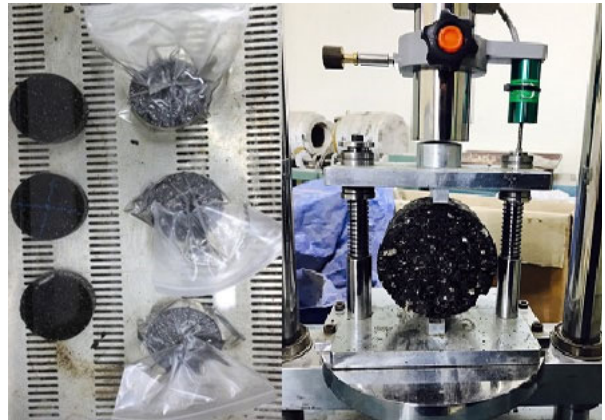


Fig. 4 Test for Measuring Tensile Strength Ratio

3.4.3. 동적수침 실험

동적수침 실험은 수침 상태에서의 아스팔트 바인더와 골재 사이의 접착력을 평가하기 위하여 수행하였다. 실험은 'EN 12697-11, Determination of the affinity between aggregate and bitumen'에 따라서 진행하였다. 동적수침 실험에서 사용한 혼합물은 8mm~11.2mm 크기의 RAP에 각각의 목표 PG에 맞게 재생첨가제를 투입하여 제작하여 24시간 동안 실온에서 양생하였다. 양생을 거친 혼합물은 동적수침용 유리병에 각각 150g씩 투입하고 Fig. 5와 같은 동적수침 실험장비를 이용하여 24시간동안 60rpm의 속도로 회전시킨 후 실험 시작 전·후의 무게비로 결과를 도출하였다.



Fig. 5 Equipment for Dynamic Immersion Test

4. 결과 분석

중온화 재생첨가제의 투입량에 따른 재생 아스팔트 혼합물의 특성을 평가하기 위하여 준비된 RAP를 8mm 체 기준으로 잔골재와 굵은골재로 분류하였으며, 분류

된 RAP는 배합 시에 50:50 비율로 혼합하여 합성입도를 구축하였다. 재생 아스팔트 혼합물은 가열온도 130℃, 다짐온도 115℃에서 마샬 다짐기를 이용하여 다짐횟수별 공시체를 제작하였으며, 중온화 재생첨가제를 투입하지 않은 혼합물은 일반 가열 아스팔트 혼합물과 같이 가열온도 160℃, 다짐온도 145℃에서 제작하였다. 제작된 공시체는 Table 3에 나타난 바와 같이 '아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침'에 명시된 품질기준과 본 연구에서 제작한 재생 아스팔트 혼합물의 결과를 비교해본 결과 75회 다짐 시에 기준에 부합하는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 50회 다짐 시에는 공극률과 포화도가 기준에 만족하지 않아 $ESAL > 10^7$ 기준을 적용하여 75회 다짐한 공시체를 사용하였다. 또한 Table 3의 결과를 통해 인장강도비(TSR) 실험을 위한 공시체 제작에 필요한 다짐횟수를 55회로 결정하였다.

Table 3. Specification of Asphalt Specimen and Quality Standard

	Quality standard WC-3(20)	Spec. of asphalt specimen		
		50	60	75
Compaction cycle	-	50	60	75
Voids (%)	3 - 6	7.31	6.39	5.97
Saturation (%)	65 - 80	62.51	65.80	67.42
VMA (%)	15 -	19.48	18.68	18.3

4.1. 변형강도 실험 결과

Table 4는 첨가제 함량에 따른 변형강도 결과이며 Fig. 6에 그래프로 나타내었다. 아스팔트 혼합물의 역학적 거동은 아스팔트 바인더의 특성뿐만 아니라 골재의 맞물림과도 밀접한 관련이 있다. 변형강도의 결과는 RAP 골재의 불균질한 특성을 간접적으로 보여준다. 동적전단레오미터(DSR) 실험 결과에서는 실험온도나 재생첨가제의 첨가에 따른 일정한 경향을 보이지만 재생 아스팔트 혼합물은 재생첨가제의 투입량에 따른 규칙적인 경향을 찾기 어렵다. 그러나 두 종류의 재생첨가제 모두 첨가 전·후의 변형강도가 감소하는 뚜렷한 경향을 보였으며, 또한 재생첨가제의 함량에 따라서 최대변위가 증가하였다.

변형강도 감소 및 변위 증가는 소성변형 저항성의 감소로써 해석할 수 있으나 강성이 증가한 RAP를 배합재료로 사용한 경우에 변형강도의 저하는 노화된 바인더

가 연성을 회복한 것으로 추론할 수 있다. 재생첨가제가 첨가된 아스팔트 혼합물의 성능을 평가하기 위해서는 강제노화를 진행한 아스팔트 바인더와 신규골재를 혼합하여 RAP를 모사할 경우 합성입도나 아스팔트 함량 등에서 보다 통제가 용이할 것으로 판단된다.

Table 4. Result of Deformation Strength Test

Type	Contents of rejuvenator (%)	Maximum displacement (mm)	Maximum load (N)	Deformation strength (N/mm ²)
Non-rejuvenator	0	1,305	4,842	6.94
	2.4	1,448	4,072	5.65
Imported	5.1	1,544	3,230	4.39
	7.9	1,735	3,742	4.90
Developed	2.4	1,447	4,540	6.30
	5.1	2,047	3,610	4.48
	7.9	1,791	4,322	5.60

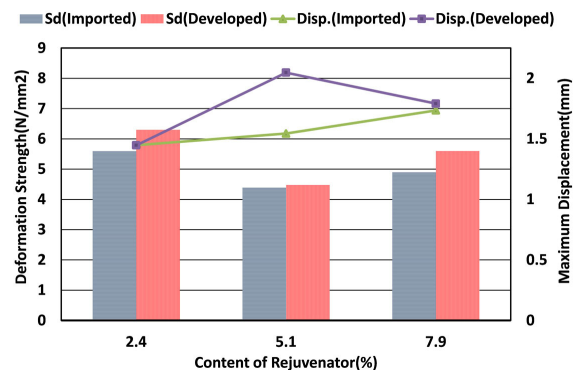


Fig. 6 Result of Deformation Strength Test (Graph)

4.2. 인장강도비 실험 결과

수분에 대한 민감도를 평가하기 위한 인장강도비 실험 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 개발한 재생첨가제의 경우에는 투입량에 따라서 재생첨가제가 투입되지 않은 혼합물에 비해 각각의 투입량에 따라 0.17~0.30 가량

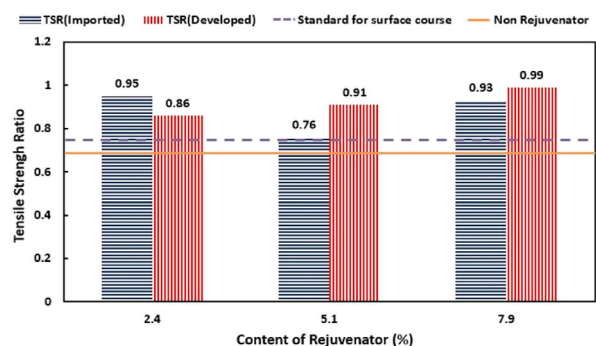


Fig. 7 Result of Tensile Strength Ratio Test

수분에 대한 저항성이 향상됨을 확인할 수 있었으며 비교군의 첨가제를 투입하여 진행된 실험 결과에서는 0.07~0.26의 수분저항성의 향상을 보였다. 개발된 재생첨가제의 실험결과가 일정한 경향을 보이며 성능의 향상을 보이지만 비교군의 결과에서 볼 수 있듯이 RAP의 불균질성이 영향을 미친 것으로 판단된다.

4.3. 동적수침 실험 결과

아스팔트 혼합물의 강도는 아스팔트의 점착력과 골재 입자간의 맞물림, 골재의 마찰저항성 등으로 결정된다 (Hwang, et al., 2005). 아스팔트 바인더는 혼합물 내의 골재와 골재를 결합시켜주는 역할을 수행하며 골재와 바인더 사이의 점착력이 충분히 확보된 상태에서 바인더의 점착력은 강도를 발현할 수 있다. 포장체는 공용기간 중 골재 표면이나 공극으로 침투하는 수분에 의하여 결합력이 저하되며 이는 박리 또는 골재 탈리의 원인이 된다. ‘아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침’에서는 동적수침을 통한 골재의 피복율 시험을 수행하여 피복율이 50% 미만일 경우 박리방지제를 사용하도록 규정하고 있다. Fig. 8은 동적수침에서 사용되고 있는 육안 평가를 통한 피복율 평가기준을 보여준다. 육안평가는 실제적으로 실험자의 주관적인 생각이나 숙련도에 의하여 결과가 좌지우지될 수 있다. 이러한 문제점을 고려하여 본 연구에서는 실험 전·후의 중량손실비율을 통하여 첨가제 투입량에 따른 동적수침 실험을 진행하였으며 결과는 Fig. 9와 같다.

동적수침 실험 결과 두 종류의 첨가제 모두 첨가량 증가에 따른 성능개선이 선형적으로 나타났다. 본 연구에서 수행한 타 실험의 경우에 RAP의 전체적인 입도를 고려하여 설계를 수행하여야 한다. 그러나 동적수침 실험은 8mm~11.2mm의 단입도 골재를 선별하여 사용함으로써 첨가제 투입량에 따른 경향을 보다 정확하게 파악할 수 있는 것으로 판단된다. 비교군의 재생첨가제의 경우 바인더 중량의 2.4%를 치환 적용하였을 때 재생첨가제를 투입하지 않은 혼합물과 큰 차이를 보이지 않았으나 첨가제의 함량이 증가할수록 박리저항성이 개선됨을 확인하였다. 반면 개발된 재생첨가제는 목표 고온등급에 도달하기 위한 최소 첨가량인 2.4%(PG 76)에서의 중량감소율이 일반 RAP의 결과보다 두배 이상 개선되었으며 PG 64의 목표 고온등급에 도달하기 위한 7.9%의 투입량에서는 중량손실율이 2.0%로 매우 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 재생첨가제에 포함된 박리방지제의 함량 증가에 따른 변화로 판단된다. Fig.

9에 나타난 선형 추세선으로 재생첨가제 투입량 증가에 따른 중량감소율의 개선효과로 본다면 비교군 재생첨가제(기울기: -2.125)는 투입량이 증가할수록 개발된 재생첨가제(기울기: -1.3)에 비하여 더 빠르게 개선됨을 알 수 있다. 그러나 7.9% 투입량에서도 3.4% 정도의 성능 차이를 보이는 것과 재생첨가제가 혼합물 내에서 차지하는 비율을 고려한다면 박리저항성 측면에서 볼 때 개발한 재생첨가제가 비교군의 첨가제에 비해서 충분히 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

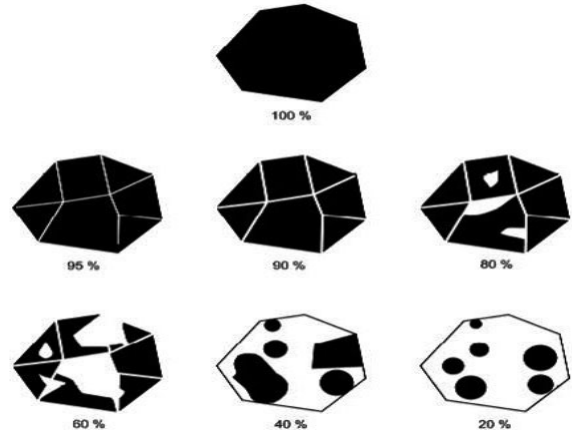


Fig. 8 Reference for Estimation of Degree of Bitumen Coverage

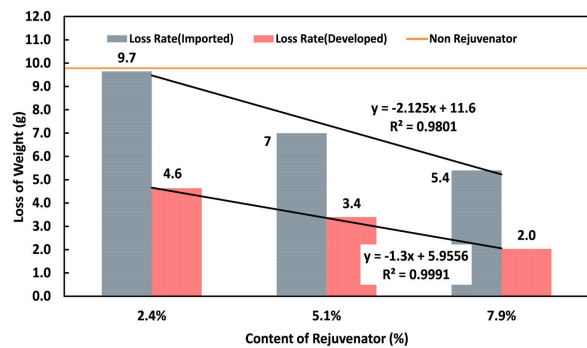


Fig. 9 Result of Dynamic Immersion Test

5. 결론

본 연구에서는 신규 재료를 투입하지 않고 RAP에 국내에서 개발된 중온화 재생첨가제를 투입하여 중온 재활용 아스팔트 혼합물을 제작하여 변형강도, 인장강도 및 동적수침 실험을 통한 소성변형 저항성 및 수분저항성 평가에 대한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 사용된 두 종류의 재생첨가제 모두 RAP

의 성능을 효과적으로 회복시켰다.

2. 변형강도 및 인장강도비 실험을 통하여 포장체의 연성 회복능력은 확인할 수 있었으며 아스팔트 혼합물의 품질기준에 만족하였다. 그러나 첨가량의 변화에 따른 일정한 경향은 파악하기 어려웠다. 이는 RAP의 불균질한 골재 특성이 영향을 미친 것으로 판단된다. '아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침'에 따르면 아스팔트 순환골재는 13mm 이하의 2단계로 나누어 투입하도록 되어 있으나, RAP이 일정 이상으로 투입된 혼합물의 경우에는 혼합물 입도에 대한 조정이 더욱 세밀하게 요구될 것으로 보인다.
3. 동적수침 결과로 보아 개발된 재생첨가제는 비교군의 재생첨가제보다 박리저항성이 우수한 것으로 판단된다. 또한 단입도의 RAP 사용은 재생첨가제 혼입량에 따른 선형적인 경향을 파악하는데 용이한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 교통물류연구사업인 "온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구"의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

REFERENCES

An, J. H., and Kim, N. S. (2016). Evaluation of Properties of Warm-Mix Recycled Asphalt Binder for Promoting the Recycled Asphalt, *JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS*, 36.6, pp.1101-1107.

Department of Transport and Main Roads (2012). Pavement Rehabilitation Manual, <http://www.tmr.qld.gov.au/business-industry/Technical-standards-publications/Pavement-Rehabilitation-Manual.aspx>.

Hwang, S. D., Kim, Y. M., Rhee, S. G., and Yang, S. L. (2005). Evaluation of Antistripping Additives for Asphalt Mixtures Using Dynamic Immersion Test, *Proceeding KSCE*, pp.5311-5314.

Jeong, K. D., Kwon, S. A., Im, J. H., and Son, J. T. (2016). Development of Rejuvenator for High-RAP Warm In-Place Recycling of Asphalt Pavement, *Proceeding KSCE*, pp.29-30.

Kim, J. W., and Chun, B. S. (2012). A Study on the Field Application of Superior Recycled Pavement of the Waste Asphalt, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.13, No.2, pp.67-73.

Kim, Y. M., Rhee, S. K., Jeong, G. D., and Yang S. L. (2007). A Study on Performance Properties of Waste Asphalt Binder Using Rejuvenator, *Proceeding KSCE*, pp.1875-1880.

Kwon, S. A., Yang, S. L., Lee, J. J., Hong, J. C., and Lim, J. K. (2013). A Case Study of Hot In-Place Recycling Asphalt Mixture in Korea, *Int. J. Highw. Eng.*, Vol.15, No.1, pp.57-63.

Rogers, W. (2011). Influence of Warm Mix Additives Upon High RAP Asphalt Mixes, http://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1877&context=all_dissertations.

State of California (2008). *Chapter 13 In-Place Recycling*, MTAG Volume I Flexible Pavement Preservation 2nd Edition.

Yun, T. Y., Ohm, B. S., and Yoo, P. J. (2012). Performance Evaluation of Polymer Modified Asphalt Binder with PG Testing Protocols, *Int. J. Highw. Eng.*, Vol.14, No.5, pp.47-55.