

순환골재 활성화를 위한 중온 재생 아스팔트 바인더 특성 평가

안지현* · 김낙석**

An, Ji Hun*, Kim, Nakseok**

Evaluation of Properties of Warm-Mix Recycled Asphalt Binder for Promoting the Recycled Asphalt

ABSTRACT

As an increase in the amount of RAP, there are growing interests in recycling asphalt concrete. In case of using the RAP as recycled asphalt pavement, it tends to be quality deteriorate. Therefore, the amount of RAP using is advised to be limited or has to be used with rejuvenator. In this study, asphalt mixture containing WMRA was analyzed to be used up to 50% for the sake of convenience on the process. As the results of evaluation, there was no significant difference in case of using 30% of RAP in the test of Marshall stability. However, in case of WMRA using up to 50%, it was satisfied criteria by flow value at 34.7. Further, result of toughness test was found that the crack resistance showed 55% higher than using straight asphalt when using WMRA binder up to 50%. According to the results of directly comparing crack resistance through repeated direct tensile test, it was shown that the fatigue crack resistance of WMRA pavement was increased by 263%. Therefore, it was shown that WMRA binder was effective in recycling RAP because WMRA binder could increase the percentage of RAP using up to 50%.

Key words : Recycled asphalt, Rejuvenator, RAP, Repeated direct tensile test

초 록

폐아스팔트 콘크리트(RAP)의 발생이 증가함에 따라 이를 자원으로 재활용 할 수 있는 재생 아스팔트 콘크리트에 대한 관심이 높아지고 있다. 폐아스팔트 콘크리트를 아스팔트 콘크리트용 순환골재로 사용할 경우 품질저하로 인해 사용량을 제한하거나 재생첨가제를 사용하도록 하고 있다. 본 연구에서는 공정상의 편리성을 위해 재생첨가제가 포함된 중온 재생 아스팔트 바인더(WMRA)를 사용하여 RAP의 사용비율을 50% 까지 증가시킬 수 있는 재생 아스팔트 콘크리트의 실내 공용성능 평가를 수행하였다. 마찰안정도 실험 결과 RAP 30% 사용시에는 WMRA 바인더와 스트레이트 아스팔트 바인더 사용시 큰 차이가 없었으나 RAP 혼합비율이 50%로 늘어날 경우 WMRA 바인더 사용시 흐름값 34.7 (1/10 mm)로 기준을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 간접인장강도 실험의 터프니스 계산 결과 RAP 사용비율 50% 일 때 WMRA 바인더 사용시 스트레이트 아스팔트 바인더 사용시에 비해 55% 높은 값을 나타내어 균열저항성이 향상된 것을 알 수 있었다. 또한 반복직접인장실험을 통해 직접적인 균열저항성 비교 결과 WMRA 재생 아스팔트 콘크리트의 피로균열 저항성이 263% 증가하는 것으로 나타나 WMRA 바인더가 RAP 사용비율을 50%까지 높일 수 있어 RAP의 재활용에 효과적인 것으로 나타났다.

검색어 : 재생 아스팔트, 재생첨가제, 순환골재, 직접반복인장실험

* 정회원 · 교신저자 · 경기대학교 토목공학과 석사과정 (Corresponding Author · Kyonggi University · jihun428@gmail.com)

** 종신회원 · 경기대학교 토목공학과 교수 (Kyonggi University · nskim1@kgu.ac.kr)

Received August 26, 2016/ revised September 20, 2016/ accepted October 14, 2016

1. 서론

국내 건설폐기물의 발생량은 매년 증가하고 있다. 『2014 전국 폐기물 발생 및 처리현황』에 의하면 2014년 건설폐기물은 6,766만 톤에 달하며, 그 중에서 폐아스팔트 콘크리트는 1,230만 톤으로 2005년도에 비해 2배 이상 증가하였고 앞으로도 계속 증가할 것으로 예상되고 있다(ME, 2015). 한국순환아스콘협회 통계자료에 따르면 아스팔트 콘크리트의 골재로 폐아스팔트 콘크리트를 순환골재(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)로 사용하는 재생 아스팔트 콘크리트의 생산량은 2014년 기준 150만 톤으로 연간 전체 아스팔트 콘크리트 생산량인 2,347만 톤의 15%로 아직까지 재생 아스팔트 콘크리트가 활발히 적용되지 못하고 있는 것으로 나타났다(http://www.krascon.or.kr). 최근 순환골재 사용을 확대하여 적용하고 있으나, 수급문제로 인해 현장과의 거리에 따라서 순환골재 사용이 어려운 상황이다. 또한 현재 일반적으로 사용되는 재생 아스팔트 콘크리트의 순환골재 사용 비율은 20~30%에 불과하다. 이는 RAP의 사용비율이 높을 경우 품질확보의 어려움과 재생첨가제의 별도 사용이 필요하기 때문이다.

RAP의 활용을 촉진하기 위해 정부에서는 순환골재의 의무사용을 규정하고 순환골재·순환골재재활용제품의 사용용도 및 의무사용량에 관한 고시를 하였으며, 연도별 건설폐기물 사용 목표율을 설정하여 2020년 까지 선진국 수준(50% 이상)으로 높여 나갈 계획이다(KS I 3005:2014). 이에 따라 본 연구에서는 재생첨가제와 중온첨가제가 혼합된 중온 재생 아스팔트 바인더(WMRA)를 사용하여 RAP 사용비율 50% 이상의 중온 재생 아스팔트 콘크리트의 배합설계를 수행하고 실내 공용성능 평가를 통한 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 아스팔트바인더의 산화 및 노화 특성

아스팔트 콘크리트 포장의 공용특성에 영향을 주는 중요 요소 중의 하나는 아스팔트 바인더의 유변학적(rheology) 특성이다. 아스팔트 바인더는 외부 환경에 직접 노출되어 공기 중에 산소와의 반응 및 자외선, 물 등에 접하기 때문에 아스팔트 바인더의 성분 변화가 일어나면서 노화가 진행된다. Fig. 1과 같이 18년 공용 후의 아스팔트 바인더의 조성 변화를 살펴보면 아스팔트 바인더에 함유되어 있는 방향족(Aromatic)이 크게 감소하고 레진 성분이 증가한 것을 확인할 수 있다(Lee, 2006).

노화된 아스팔트 콘크리트 포장은 피로 균열(Fatigue Crack)이 발생하게 되는데 아스팔트 콘크리트 포장체의 구조적인 지지력의 약화에 의해 문제가 발생된다. 이러한 노화된 아스팔트 콘크리트 포장은 반복 교통 하중에 의해 표층의 하부로부터 발생된 균열이

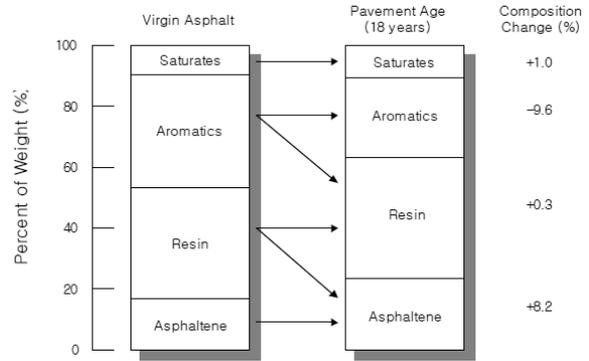


Fig. 1. Asphalt Chemical Composition Changes (Lee et al., 2006)

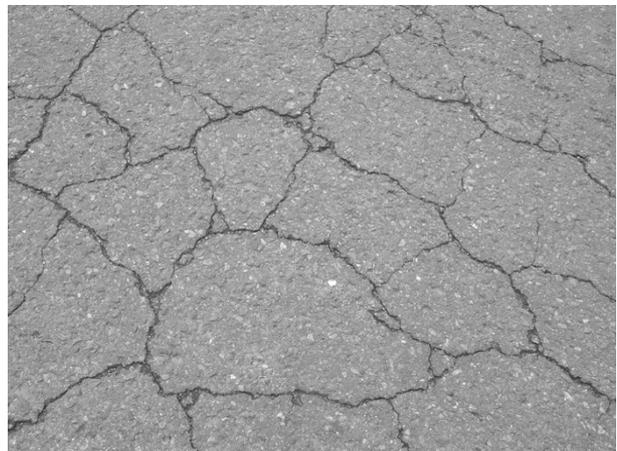


Fig. 2. Alligator Crack (Huh, 2009)

상부로 전진되어 발생하는 균열로서 대부분이 거북등 균열로 진행되는 것으로 알려져 있다. Fig. 2는 아스팔트 콘크리트의 거북등 균열 현상을 보여주고 있다. 따라서 거북등 균열이 생긴 아스팔트 콘크리트는 포장수명이 종료되었다고 평가한다(Huh, 2009).

3. 재료

3.1 중온 재생 아스팔트 바인더(WMRA)

RAP에 잔류하는 노화 아스팔트는 경화되어있으므로 아스팔트 혼합물 생산 시 혼합성이 저하되고 포장 균열 발생을 증가시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 혼합성을 향상시켜주고, 노화된 아스팔트의 물성을 회복시켜 줄 수 있는 재생첨가제가 필요하다. 중온 재생 아스팔트 바인더(WMRA)는 바인더 내에 노화된 잔류 아스팔트 바인더를 회복시켜주는 재생첨가제가 포함되어 있어 별도의 재생첨가제 사용 없이 재생 아스팔트 혼합물을 생산할 수 있다. RAP의 잔류 아스팔트 바인더와 WMRA 바인더와의 혼합시 공용

성 등급 PG 64-22의 바인더를 얻을 수 있도록 설계되었다.

RAP의 가열온도를 낮춰 추가적인 노화진행을 최대한 억제하고, 아스팔트 혼합물 생산시 소비 연료의 절감과 온실가스 배출을 저감하기 위한 중온기술을 접목하였다. 또한 저온에서의 균열 저항성을 향상시키기 위한 폴리에테르아민 성분을 포함하고 있으며, 박리저항성을 위한 첨가제가 혼합되어 있다.

3.2 순환골재(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)

순환골재(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)는 재생 아스팔트 콘크리트 포장의 품질과 성능에 가장 큰 영향을 미친다. 일반적으로 RAP을 사용한 재생 아스팔트 콘크리트 포장은 경화된 아스팔트가 함유되어 있으므로 소성변형에는 강한 반면 피로 균열에는 약한 단점이 있다. 실내실험 결과 마찰 안정도는 신규 혼합물의 표층기층 규격을 상회하나, 신규 혼합물로 포장한 경우보다 조기에 균열이 발생할 수 있다(Kim, 2012). 또한 RAP은 채취되는 지역에 따라 아스팔트함량의 변화가 생길 수 있으므로 재생 아스팔트 혼합물의 품질 균질성이 떨어질 수 있다. 따라서 유동성 있고 폭넓게 사용할 수 있는 재생첨가제가 포함된 아스팔트 바인더가 필요하다. 본 연구에서 『건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률』에 따른 재생 아스팔트 콘크리트용 순환골재의 품질기준은 국토교통부에서 공고한 『순환골재 품질기준』에 규정된 방법에 따라 품질 시험을 실시하였다. 그 결과 연구에 사용한 RAP 품질은 Table 1과 같으며 입도시험결과는 Fig. 3과 같다.

Table 1. Physical Properties of Reclaimed Asphalt (MOLIT, 2012)

Type	Rescription	Result
Old Asphalt Content (%)	3.8<	4.42
penetration (25°C, 1/10 mm)	20<	30
Amount of Material passing test size 0.08 mm in aggregates (%)	5>	1.7

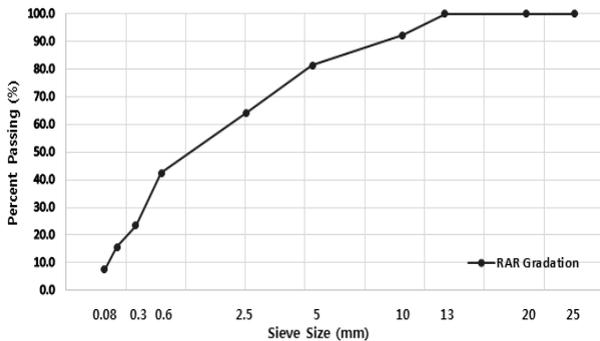


Fig. 3. Plots of Design Gradation for Warm and Hot-Recycled Asphalt Mixtures

4. 시험결과 및 분석

4.1 아스팔트 혼합물의 배합설계

WMRA 바인더 혼합물의 RAP 사용량에 따른 공용성을 평가하기 위해(Case I)RAP 30% + 신규골재(VA) 70%, (Case II)RAP 50% + 신규골재(VA) 50%의 골재 배합비율로 수행하였다. RAP의 혼합량에 따른 골재의 합성입도 곡선은 Fig. 4와 같으며 합성입도 분포는 Table 2와 같다.

Table 2의 합성입도로 배합설계를 진행하였으며, 최적 아스팔트 함량(Optimum Asphalt Content, OAC)의 결정은 공극률 4%를 나타내며 품질기준(SPS-KAI0002-F2349-5687)을 만족하는 것을 기준으로 하였다. 또한 배합설계를 위한 공시체제작은 WMRA 바인더 및 Straight Asphalt (SA) 바인더의 혼합온도는 각각 135±5°C, 160±5°C, 그리고 다짐온도는 각각 115±5°C, 135±5°C였으며, 마찰다짐기를 사용하여 양면 75회 다짐을 실시하였다. 배합설계 결과 RAP의 잔류아스팔트 바인더와 WMRA 바인더를 합한 OAC를 4.9%로 결정하였다.

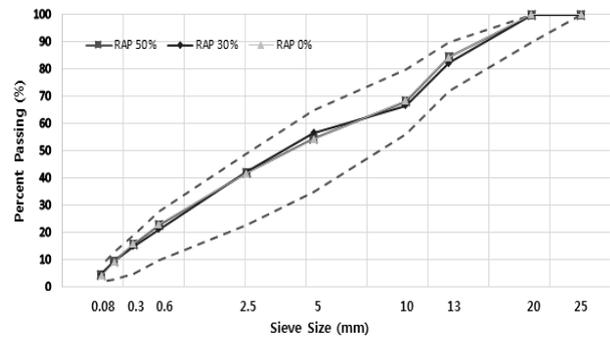


Fig. 4. Blended Grade According to RAP

Table 2. Design Aggregate Blend for District Asphalt Mix Designs

Sieve	RAP (%)		
	RAP 0	RAP 30	RAP 50
25 mm	100	100	100
20 mm	100.0	100.0	100.0
13 mm	84.4	82.4	84.4
10 mm	68.3	66.6	68.3
5 mm	54.3	56.6	54.3
2.5 mm	41.8	42.4	41.8
0.6 mm	23.0	21.2	23.0
0.3 mm	15.8	15.1	15.8
0.15 mm	9.4	9.4	9.4
0.08 mm	4.4	4.9	4.4

4.1.1 마샬 안정도 시험 결과

배합설계에 따라 공시체를 제작하고 마샬안정도 시험을 실시하였으며, 결과는 Table 3과 같다.

Fig. 5에 나타난 것과 같이 RAP 30%와 RAP 50% 사용 아스팔트 혼합물의 마샬안정도는 품질기준(SPS-KAI0002-F2349-5687) 7,500 N을 만족하였으나 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물에 비해 WMRA 바인더를 사용한 아스팔트 혼합물의 마샬안

Table 3. Results of Marshall Stability Test

Mixture	Binder Type	Stability (N)	Flow (1/10 mm)
RAP 30%	SA	14,361	21.5
		11,782	22.3
		13,139	24.2
	AVE.	13,094	22.7
	WMRA	11,445	27.4
		9,656	30.8
		10,121	29.0
AVE.	10,407	29.1	
RAP 50%	SA	12,534	18.4
		10,504	19.8
		9,604	18.1
	AVE.	10,881	18.8
	WMRA	9,870	32.2
		8,346	36.5
		9,086	35.4
AVE.	9,101	34.7	
VA 100%	SA	10,750	24.5
		10,570	27.1
		10,497	28.8
	AVE.	10,606	26.8

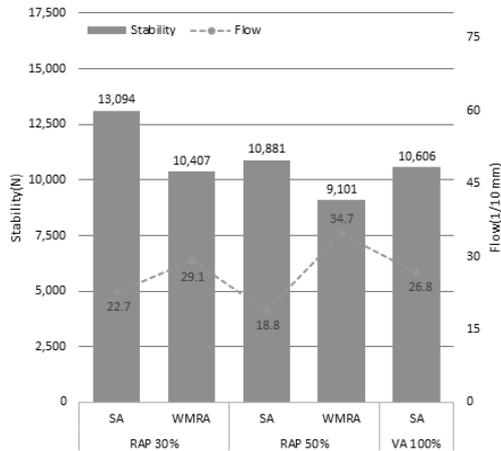


Fig. 5. Results of Stabilit

정도가 약 23% 낮은 것으로 나타났다. 흐름값은 스트레이트 아스팔트 바인더에 RAP 50%를 사용한 혼합물은 노화된 잔류 아스팔트 바인더의 영향으로 스티프니스가 증가하여 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

4.1.2 간접인장강도 및 터프니스 시험 결과

터프니스는 변형에 대한 저항성, 즉 변형에너지를 흡수 할 수 있는 정도를 나타내는 척도로서 혼합물의 균열 저항성을 평가하는



Fig. 6. Indirect Tensile Strength : ITS

Table 4. Results of ITS Test

Classification	Binder Type	ITS (MPa)	Disp. (mm)	Toughness (N·mm)
RAP 30%	SA	1.04	1.310	10,267
		1.04	1.339	10,012
		1.01	1.345	11,450
	AVE.	1.03	1.331	10,450
	WMRA	0.85	1.639	12,067
		0.98	1.557	10,492
0.95		1.530	9,892	
AVE.	0.93	1.575	10,817	
RAP 50%	SA	1.08	1.211	7,493
		1.07	1.310	7,854
		1.03	1.255	6,587
	AVE.	1.06	1.259	7,311
	WMRA	1.05	1.559	10,543
		1.01	1.638	11,886
0.87		1.598	11,604	
AVE.	0.98	1.598	11,344	
VA 100%	SA	1.05	1.345	11,524
		1.01	1.364	11,006
		1.04	1.243	11,016
	AVE.	1.03	1.317	11,182

대표적인 측정값이다. 본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 간접인장 강도 시험방법(KS F 2382)에 따라 공시체를 50 mm/min의 재하속도로 상온 25±0.5°C에서 시험을 수행하였다.

WMRA 바인더와 스트레이트 아스팔트 바인더로 제작한 혼합물에 대하여 Fig. 6과 같이 간접인장강도 시험을 실시하여 RAP 혼합비율에 따른 아스팔트 콘크리트의 균열 저항성을 확인하고자 한다.

시험결과 Table 4와 같이 간접인장강도 및 터프니스는 SPS-KAI0002-F2349-5687의 기준치인 각각 0.8 MPa 이상을 만족하였다. 간접인장강도의 경우 Fig. 7에 나타난 것과 같이 스트레이트 아스팔트 바인더 혼합물이 WMRA 바인더 혼합물에 비해 높은 값을 나타내나 파괴시 변형량은 WMRA 바인더 혼합물이 약 18~27% 더 큰 값을 나타내었다. 하중곡선의 면적을 계산하여 균열저항성을 평가하는 터프니스 계산 결과 RAP 50%에 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물을 제외하고 기준 8,000 N·mm 이상을 만족하였다.

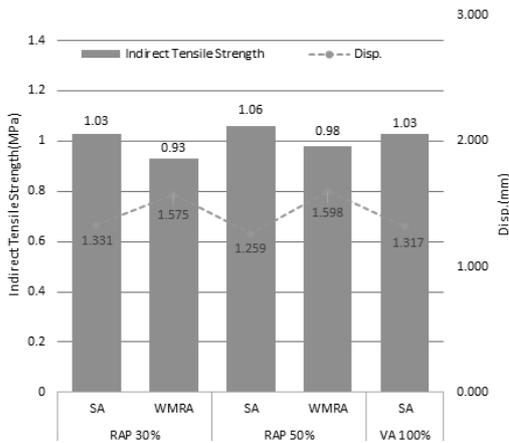


Fig. 7. Calculation Results of Indirect Tensile Strength

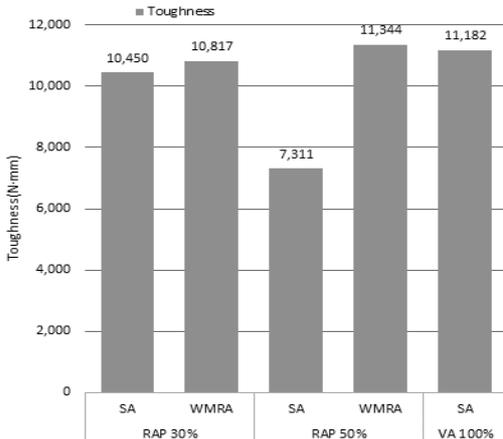


Fig. 8. Calculation Results of Toughness

Fig. 8과 같이 터프니스값을 살펴보면 RAP 30% 일때는 스트레이트 아스팔트 바인더와 WMRA 바인더가 비슷한 값을 나타내나 RAP 50%의 경우 WMRA 바인더를 사용한 혼합물이 55% 더 높은 값을 나타내어 신규골재만 사용한 아스팔트 혼합물과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. RAP의 혼합비율이 증가하면 노화된 잔류 아스팔트 바인더의 영향이 더 커지기 때문에 재생첨가제가 함유된 WMRA 바인더의 효과가 명확히 확인되었다.

4.2 반복직접인장 시험

4.2.1 시험방법

반복직접인장 시험이란 아스팔트 콘크리트의 반사균열 저항성을 관측하기 위한 시험으로 일정한 변위로 반복하여 실험한다. 시험의 원리는 Fig. 9와 같으며 Texas 도로국(Zhou and Scullion, 2005)에서 제작한 TTI (Texas Transportation Institute) 반사균열 시험기를 참고하여 시험을 진행하였다.

시험은 Fig. 10과 같이 길이 150 mm, 폭 70 mm, 높이 50 mm 크기의 아스팔트 콘크리트 공시체로 실시하였다. 시험공시체는 시험용 금속판에 접착하였다. 간극(opening gap)을 2 mm로 하였으며, 변형은 시험용 금속판을 좌우로 0.64 mm 반복 재하로 인해 아스팔트 콘크리트 혼합물이 파손될 때의 반사 균열 저항성을 평가하였다. 0.64 mm의 변형재하는 Texas 도로국의 시험 규정(Zhou and Scullion, 2005)을 참고하여 수행하였다.

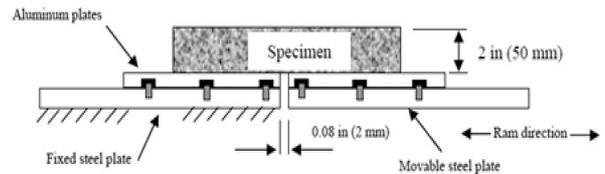


Fig. 9. Concept of Overlay Tester



Fig. 10. Specimens for Test

4.2.2 반복인장시험 결과

시험 결과 사진은 Fig. 11과 같으며 아스팔트 콘크리트 공시체에 반복적인 인장 변형이 가해지면서 시험기에 측정되는 하중을 기준으로 초기 하중의 70%, 50%, 30%, 10%일 때의 반복재하 횟수를 측정하여 RAP 함량에 따른 WMRA 바인더 및 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 비교/평가 하였다.

아스팔트 콘크리트 공시체의 반복적인 인장 변형으로 인장강도가 감소하는 것을 파괴 시점으로 결정하였다. RAP 30% 시험 결과는 Table 5와 같으며 변형재하는 0.64 mm로 수행하였다. 초기 하중의 70~30%의 경우는 아스팔트 콘크리트 공시체 조건에 따른 변화는 나타나지 않았다. 균열이 상부까지 진전되는 파괴시점인 잔류인장하중 10%의 경우에는 아스팔트 콘크리트 공시체 조건에 따른 변화가 나타났으며, WMRA 바인더를 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물이 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물 보다 약 11%의 높은 값을 나타내었다.

RAP 50%의 경우는 변형재하를 0.64 mm로 하였을 때 균열이 아스팔트 콘크리트 공시체의 2/3지점에서 더 이상 상부로 진전되지 않아 변형재하를 0.80 mm으로 변경하여 시험을 수행하였다. 시험

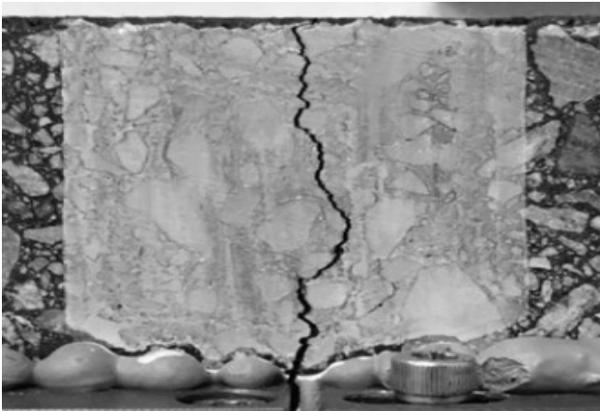


Fig. 11. Crack of The Specimen

Table 5. Test Results by Thickness (0.64 mm)

Classification	Binder Type	Repetition No. at Retained Load			
		70%	50%	30%	10%
RAP 30%	SA	3	7	32	953
	WMRA	2	5	27	1059

Table 6. Test Results by Thickness (0.8 mm)

Classification	Binder Type	Repetition No. at Retained Load			
		70%	50%	30%	10%
RAP 50%	SA	4	10	28	316
	WMRA	3	7	50	832

결과 RAP 50% 초기 하중의 70~30%는 미미한 차이가 나타나나 파괴시점인 잔류인장하중 10%의 경우 WMRA 바인더를 사용한 혼합물이 263% 더 높은 값을 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 RAP (혼합물 중량 대비 30%, 50%)에 WMRA 바인더를 적용하여 중온 재생 아스팔트 혼합물을 평가하는 내용을 다루고 있다. 이를 위하여 기본적인 물성 및 유변학적 물성 시험을 실시하여 WMRA 바인더의 재료적 성능과 물리적 개선효과를 확인할 수 있었다.

- (1) 재생 아스팔트 혼합물의 마찰 배합설계 결과, WMRA 바인더의 중온화 성능으로 인해 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물에 비해 혼합 및 다짐온도를 약 20°C 낮은 온도에서 혼합이 가능했으며 또한 다짐성이 우수한 것으로 평가되었다.
- (2) WMRA 바인더는 재생 아스팔트 혼합물 생산시 RAP의 활용 가능한 혼합비율은 30~50%로 제작되어 있다. 본 연구에서 사용된 RAP으로 재활용 시 30%에서 WMRA 바인더의 성능 효과는 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물과 거의 유사하거나 약간 높은 성능을 보여주었다. 하지만 RAP 50%의 경우 증가된 노화 잔류 아스팔트 바인더의 영향으로 스트레이트 아스팔트 혼합물은 품질기준에 만족하지 못하는 결과가 나타났으나 WMRA 바인더에 재생첨가제가 첨가된 WMRA 아스팔트 혼합물의 경우 개선된 성능 효과를 보여주었다.
- (3) 각각의 아스팔트 혼합물의 대한 터프니스 결과 RAP 30%의 경우 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물에 비해 WMRA 바인더를 사용한 혼합물이 4% 높게 측정 되었지만 개선효과가 미미하게 나타났다. 소량의 RAP 사용에 맞는 대책이 필요하다. RAP 50%의 경우 WMRA 바인더를 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물이 55%의 더 높은 값을 나타내었으며, 신규골재만 사용한 아스팔트 혼합물과 유사한 결과값을 나타내었다.
- (4) TTI 시험을 통해 터프니스 결과를 증명을 목적으로 추가적으로 진행 하였으며 시험 결과 WMRA 바인더를 사용한 아스팔트 혼합물이 263% 성능 향상됨에 따라 균열에 대한 저항성 향상 효과를 명확히 얻을 수 있었다.

WMRA 바인더를 활용해 RAP 50% 재생 아스팔트 콘크리트를 생산 시 다량의 RAP의 사용으로 경제성을 높일 수 있으며 더불어 환경친화적인 도로건설공법의 활성화에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 교통물류사업인 “온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구”의 연구지원으로 수행되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

본 연구는 2016학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- Huh, J. D. (2009). “Development of new technology for 100% RAP recycling.” *2009 International Journal of Highway Engineering*, Korean Society of Road Engineers, pp. 583-586 (in Korean).
- Kim, U. Y. (2012). “A study for recycling of waste asphalt by warm mix asphalt rejuvenator.” Thesis, Kyunghee University (in Korean).
- Korea Recycled Asphalt Association (2015). Available at: http://www.krascon.or.kr/html/board.php?boardName=board_static&mode=view&b_no=9&page=1 (Accessed: August 24, 2015) (in Korean).
- KS I 3005 (2014). “Recycled hot Asphalt Paving Mixtures.” (in Korean).
- Lee, S. H. (2006). “A study on the mechanical properties and application of modified asphalt mixture recycled aggregates.” Thesis, Daejeon University (in Korean).
- Ministry of Environment (ME) (2015). “Environmental Statistics Yearbook 2014.” (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2012). Notification No. 2012-1096 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2014). Notification No. 2014-105 (in Korean).
- Zhou, F. and Scullion, T. (2003). “Upgraded overlay tester and its application to characterize reflection cracking resistance of asphalt mixtures.” Report No. FHWA/TX-04/0-4467-1, Texas Transportation Institute.
- Zhou, F. and Scullion, T. (2005). “Overlay tester- a rapid performance related crack resistance test.” Report FHWA/TX-05/0-4467-2, Texas Transportation Institute.