JOURNAL of the Korean Asphalt Institute Vol. 13, No. 2, 372-386, 2023
https://doi.org/10.22702/jkai.2023.13.2.31

pISSN: 2234-0785
eISSN: 2635-9553

Scientific Paper

중온 첨가제가 아스팔트 혼합물의 파괴인성 및 노화량에 미치는 상관성에 관한 연구

안순용[1] · 박태순[2]* · 김광우[3]
[1]㈜동명기술공단, 부사장(박사), [2]서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수(박사), [3]강원대학교 교수(박사)

Effect of warm-mix additives on the fracture toughness and aging of asphalt binders and mixtures

Soon yong An[1], Tae Soon Park[2]*, Kwang W. Kim[3]

[1]Ph.D, Responsible Technician. of national highway construction, Dongmyeong Engineering Consultants, Seoul, 05203, Korea
[2]Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 01811, Korea
[3]Professor, Dept. of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 24341, Korea

***Corresponding author:** Tel. +82-10-5383-2220, E-mail. tpark0208@naver.com

Received: December 3, 2023; **Revised:** January 4, 2024; **Accepted:** January 12, 2024

ABSTRACT

The carbon neutrality movement, which is emerging globally, has made carbon dioxide reduction a necessary topic, not an option, to reduce greenhouse gases due to climate change. In order to realize this theme, we actively protect the environment by dramatically reducing carbon dioxide emitted from heated asphalt and saving fuel. In order to adapt to environmental issues such as fine dust and climate change, the aggregate heating temperature is increased from 165°C to 135°C. The WMA method, a groundbreaking packaging method that lowers the temperature by 30°C, was developed. However, asphalt mixture is a ductile or viscoelastic material at room temperature, but becomes a brittle material similar to cement concrete at sub-zero temperatures. The low-temperature KIC value of the asphalt mixture presented in previous studies was confirmed to be in the range of 0.6 to 2.2 In addition, it is important to identify mechanical properties related to fracture crack resistance, referred to as the critical stress intensity coefficient or KIC, of asphalt mixtures at low temperatures, and extensive attempts are being made to improve low-temperature properties. Therefore, in this study, based on the research results of several researchers on WMA, the moisture present inside the aggregate of WMA and HMA and the aging of the asphalt binder may be more susceptible to low-temperature brittle fracture at a slightly higher temperature than general WMA. This study was conducted to investigate the effect and influence of the fracture toughness of produced polymer-modified WMA and polymer-modified HMA and their correlation with aging amount.

Keywords: Warm mix asphalt, Indirect tensile strength test, Fracture toughness, AQ, Kim test

© 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

세계적으로 대두되고 있는 탄소 중립 운동은 기후 변화에 따른 온실가스 저감을 위한 이산화탄소 저감은 선택이 아닌 필수 주제가 되었다. 이 주제를 실현하기 위하여 가열아스팔트(Hot mix asphalt: 이하 HMA로 표기함)에서 발생하는 이산화탄소를 획기적으로 줄이고 연료를 절감하여 환경을 적극적으로 보호하고, 환경적 이슈에 적응하기 위해 골재 가열온도를 165°C에서 135°C로 30°C 낮춘 획기적인 포장 공법인 중온 아스팔트(Warm mix asphalt: 이하 WMA로 표기함) 공법이 개발되였다.

그러나, 아스팔트 혼합물은 상온에서는 연성 또는 점탄성 재료이지만 영하의 기온에서는 시멘트 콘크리트와 유사하게 취성재료가 된다. 그간의 연구에서 제시된 아스팔트 혼합물의 저온 K_{IC} 값은 0.6~2.2 수준으로 확인되었다(권승준 등, 1999; 홍준표, 2012; Lee et al., 1994; Kim and El Hussein, 1995; Mihai et al., 2002; Kim et al., 2003; Yoo et al., 2011). 그 외에도 저온 특성을 향상시키기 위한 광범위한 시도들이 이루어지고 있다(Kim et al., 2012, 2013; Yun et al., 2014; Kim et al., 2015). 따라서, 본 연구에서는 WMA에 대한 여러 연구자들의 연구결과를 바탕으로 WMA와 HMA의 골재 내부에 존재하는 수분과 아스팔트 바인더의 노화로 인한 저온 취성파괴에 더 취약할 수 있는 일반 WMA보다 약간 더 높은 온도에서 생산되는 폴리머 개질 WMA와 폴리머 개질 HMA의 파괴인성과 노화량과의 상관성에 대한 효과와 영향을 조사하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

2. 사용 재료

2.1 아스팔트 바인더

가열 아스팔트 포장은 아스팔트 최적 함유량를 적용하여 160°C ± 10°C의 고온으로 AP와 잔골재, 굵은 골재, 채움재를 혼합한 아스팔트 혼합물을 가열 생산하여 시공하는 것이다. 본 연구에서 사용한 기본이 되는 아스팔트 바인더는 국내에서 많이 사용되고 있는 AP-5를 사용하였으며, 공용성 등급은 PG 64-22(침입도 60~80)를 사용하였다(Table 1).

Table 1. Asphalt quality criteria by Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Asphalt Concrete Pavement Construction Guide Line, 2021)

Item	quality standard (AP-5)	비고
침입도(25°C, 100 g, 5 sec)	61~80	
연화점(°C)	44.0~52.0	
신도(15°C, cm)	100 up	
톨루엔 가용분(무게 %)	99.0 up	
연화점(°C)	260 up	
박막가열 후		
질량 변화율(무게 %)	0.6 under	
침입도 잔유율(%)	55 up	
증발 후		
침입도 비(%)	110 under	
밀도(15°C, g/cm^3)	1 up	

2.2 골재 및 입도

본 연구에 사용한 골재는 화강암 쇄석으로 굵은 골재 최대 치수 13 mm와 그 부순 모래를 잔골재로 그리고 채움재는 석회석분을 사용하였다. 아스팔트 혼합물의 품질에 미치는 영향이 큰 골재는, 중량대비 약 90%~95%를 차지하며 골재가 미치는 영향을 최소화하기 위하여 편장석 비율이 적게 차지하는 1등급 골재를 선정하였다(국토교통부, 2021a). 대부분이 석산에서 생산되는 쇄석 골재를 사용하는데, 아스팔트 혼합물의 균등한 배합과 입도 관리를 용이하게 할 수 있도록 단립도의 굵은 골재를 사용하여야 한다. 사용된 굵은 골재의 입도는 Table 2와 같고 합성 입도 곡선은 Fig. 1과 같다.

Table 2. Gradation criteria for coarse aggregate (National Highway Design Practices, 2021)

sieve standard	sieve size (mm)	percentage passing (%)								
		50	40	25	20	13	10	5	2.5	1.2
4	40~20	100	90~100	20~55	0~15	-	0~5	-	-	-
5	25~13	-	100	90~100	20~55	0~10	0~5	-	-	-
6	20~10	-	-	100	90~100	20~55	0~15	0~5	-	-
7	13~5	-	-	-	100	90~100	40~70	0~15	0~5	-
8	10~2.5	-	-	-	-	100	85~100	10~30	0~10	0~5

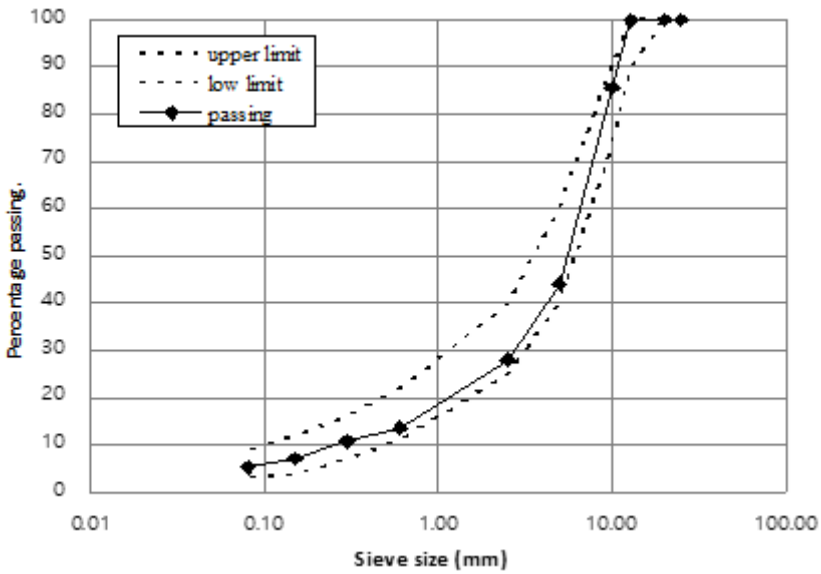

Fig. 1. Gradation curve of maximum size 13mm combined aggregate

2.3 개질제

본 연구에서 선정한 개질제 폴리머는 국내외에서 널리 사용되는 EVA(Ethylene vinyl acetate), EPDM(Ethylene propylene diene monomer), LDPE(Low-density polyethylene), SBS(styrene-butadiene-styrene)를 사용하였다. 이들 개질제는 아스팔트 바인더 개질에 가장 많이 사용되는 폴리머 첨가제로 저온에서 균열과 소성변형에 대한 저항성을 증진시키기 위해 사용한 개질제이다(최정순 등, 2012; 홍준표, 2012; Lee et al., 1994; Kim and El Hussein, 1997; Kim et al., 2003; Yoo et al., 2011). LDPE, EVA, EPDM을 적정비율(30:30:40)로 혼합하여 LVM을 제조하였으며, Table 3은 기본 아스팔트에 각 재료별 함량에 따라 개질한 PG 76-22 폴리머 개질 아스팔트(Polymer-modified asphalt : 이하 PMA로 표기함) 바인더에 대한 설명과 각 재료별 첨가량(중량, %)을 보여준다.

2.4 WMA 첨가제

본 연구에서 사용한 WMA 첨가제는 신세대 온열혼합 아스팔트 화학 첨가물인 Evothrem(ET)를 사용하였다. ET는 일반적인 아스팔트 혼합물보다 50~75°C 낮은 온도감소를 가능하게 한다(Mead west va co Asphalt Innovations, 2012). 미국 Mead west va co Asphalt Innovations사의 액상 제품으로 플랜트에서 쉽게 첨가할 수 있으며, 골재와의 결합력과 작업성 향상에 도움이 되는 것으로 제시되어있다(Evotherm, 2021).

3. 시편 제작 및 시험수행 방법

3.1 배합설계 및 시편 제작

본 연구에서는 배합설계를 통한 OAC를 결정하기 위해 WMA 용으로 일반 혼합물과 개질 혼합물의 골재는 각각 135°C와 145°C, 바인더는 160°C와 175°C로 가열하였다. 개질 아스팔트의 제조 방법은 기본 바인더를 175°C에서 녹인 후 각각의 개질 폴리머를 첨가하여 60분 동안 Homogenizer를 이용해 5,000 rpm의 속도로 교반하였다. 이때 WMA 첨가제를 사용하는 WMA 바인더의 경우에는 교반 마지막 4~5분 전에 소정량의 첨가제를 넣어 잘 섞이도록 하였다.

혼합물의 단기노화(Short-Term Aging: 이하 STA로 표기함)는 HMA는 160°C에서 1시간, 개질 HMA 중

Table 3. Designation of each binder and description

Binder	Mix	Designation	Polymer and content	WMA additive and content	Note
Normal	HMA	HAP0	No polymer	None (0%)	Base asphalt
	WMA	WAPE	No polymer	ET 0.5%	
PMA	HMA	HLV0	LV 4.8%	None (0%)	
	WMA	WLVE	LV 4.8%	ET 0.5%	
	HMA	HSB0	SB 4%	None (0%)	
	WMA	WSBE	SB 4%	ET 0.5%	

LVM 폴리머는 융점이 상대적 으로 낮아 작업성이 우수하므로 170°C, 반면 융점이 높은 SBS는 180°C에서 1시간 처리하였으며, WMA는 135°C, 개질 WMA는 145°C에서 각각 2시간 STA 처리하였다.

본 연구에 사용된 바인더와 골재의 가열 온도 및 시간은 Table 4에서와 같다. STA 용기는 직경 100 mm, 깊이 200 mm 원통으로 공시체 1개용 혼합물을 각 용기에 넣고 덮개 없이 드라이 오븐에 환풍 없이 주어진 시간 보관 후 꺼내어 몰드에 넣고 공시체를 다짐하였다. 공시체의 다짐은 SGC를 이용하여 국토교통부(2021b) 기준에 따라 PG64-22로 제조한 혼합물은 HMA, WMA 모두 2nd class highway pavement 포장용 기준인 75회 다짐하였다. PG 76-22 바인더로 제조한 개질 아스팔트 혼합물은 HMA, WMA 모두 1st class highway 포장용 기준인 선회다짐 횟수 100회로 다짐하였다.

3.2 3점 휨강도 시험 방법

저온에서 푸아송 비는 아스팔트 혼합물이 시멘트 콘크리트 수준과 유사하므로, 이 연구에서는 Karihalroo and Nallathambi(1989, 1990)에 의해 콘크리트 K_{IC} 평가에 적용된 유효균열 모델(Effective crack model : 이하 ECM으로 표기함)을 사용하였다. ECM은 3PB 시험에 뾰족한 초기균열을 만든 single-edged notched beam에서 얻어지는 결과를 사용하여 K_{IC}를 직접 평가하는 방법이다. 이는 Griffith 관계를 기반으로 개발되었으며, 균열 진전 영역내 준 취성 물질의 비선형 거동을 고려하여 수정된 모델이다(Karihalroo and Nallathambi, 1989, 1990; Kim et al., 1999).

이 연구에서 K_{IC}를 구하기 위하여 3PB 실험을 5가지의 저온(-5°C, -15°C, -20°C, -25°C 및 -35°C)에서 수행하였다. DTC는 -20°C 전·후에서 발생하는 것으로 밝혀졌기 때문에 -20°C 전·후의 온도에서는 5°C로 세분하여 측정하였다. 반면 가장 낮은 온도인 -35°C와 가장 높은 온도인 -5°C 전·후에서는 10°C 간격을 사용하였다.

배합설계를 통해 결정된 OAC로 제조한 슬래브 공시체를 일정한 규격으로 잘라서 3PB 시험용 공시체를 만들었다. 슬래브 공시체는 슬래브 몰드에 각각의 아스팔트 혼합물을 약 15 kg 넣고 롤러 컴팩터를 사용하여 4 ± 0.5%의 공극률이 얻어지도록 다짐하여 Slab공시체를 제조하였다.

제조된 슬래브 공시체(깊이(W) 70 mm 길이(L) 305 mm 폭(B) 305 mm)를 Fig. 2(a)와 같이 콘크리트 절단기를 이용하여 각각의 보를 다짐 방향으로 5개 (B = 57 mm, W = 70 mm, L = 305 mm)로 절단하여 만들었다. 그중

Table 4. Material heating temperature and STA condition by material

Polymer	Mix	Designation	Material heating (°C)		Short-term aging		Note
			Aggregate	Binder	Temperature (°C)	time (min)	
None	HMA	HAP0	165	160	160	60	Base asphalt
	WMA	WAPE	135	150	135	120	
LVM	HMA	HLV0	185	175	170	60	
	WMA	WLVE	145	150	145	120	
SBS	HMA	HSB0	185	175	180	60	
	WMA	WSBE	145	150	145	120	

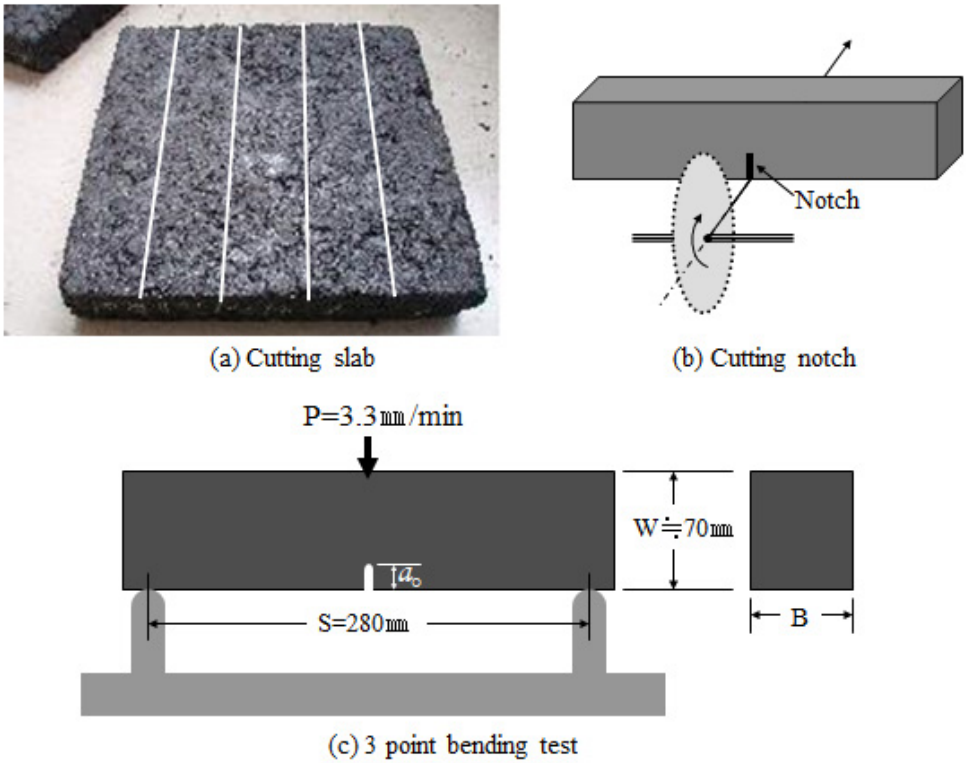

Fig. 2. Illustration of slab cutting for preparing 5 beams from a slab specimen and cutting a notch (14 mm initial crack: a_o) at the bottom center using a concrete cutter (Yoo et al., 2011)

3개의 보 공시체는 K_{IC} 시험에 사용하고 나머지 2개는 σ_n 시험에 사용하였다.

K_{IC} 시험용 공시체에는 초기균열 (이하 a_0로 표기함) 깊이 대 보 높이의 비(a_0/W)가 0.2가 되도록 깊이 14 mm (= 70 mm × 0.2)로 Notch를 공시체 하단 정중앙에 콘크리트 절단기로 만들었다(Fig. 2(b) 참조).

제조된 공시체는 각 시험 온도로 유지되는 저온 조에 48시간 보관하여 DTC가 진행되도록 한 후 꺼내어 신속히 3PB 시험을 수행하였다. 이때 측정된 data는 컴퓨터를 통하여 Excel file로 저장하여 각각의 시험체 별로 P_i, δ_i, $P_{\max}$, $\delta_{\max}$를 구하고, 파괴된 각각의 보에서 a_o, B, W를 정확히 측정하였다. 특히 a_o는 Fig. 2(b)와 같이 제시된 깊이로 절단하지만, 실제 절단된 깊이는 보가 두 동강으로 절단된 면에서 자로 정확한 깊이를 측정하였다.

3.3 시험 분석 방법

본 연구에서는 일반 HMA 1종류(AP)와 개질 HMA 2종류(LVM, SBS,)의 배합설계를 우선 수행하여 OAC를 결정하였다. 그리고 WMA에서 Table 5의 4가지 배합설계 기준을 적용하였으며, 필요시 다소 조정하였다. Table 5에서 보듯이 HMA과 WMA의 OAC는 대부분 5.6~5.8%이었으나 SBS만 모두 5.8% 이상으로 나타나 다소 높게 나타났다.

3.3.1 휨강도(σ_n) 및 파괴인성(KIC)

파괴인성(K_{IC}) 측정을 위해 보 높이의 20% 깊이로 초기 균열(Notch: a_0)이 만들어진 시험체를 측정 온도로 유지되는 저온조에서 48시간 이상 보관 후 꺼내어 속히 3점 휨 시험을 진행하였으며, 그 결과를 Tables 6~8에서 보여준다. 저온 유지시간을 48시간 적용한 이유는 시차열수축(Differential thermal contraction : 이하 DTC로 표기함)이 충분히 진행되도록 하기 위한 것이다(El Hussein and Halim, 1993; Kim and El Hussein, 1997; El Hussein et al., 1998; Yoo et al., 2011).

Table 6은 폴리머가 사용되지 않은 HMA와 WMA 보의 치수 측정치, a_0, 하중, σ_n 및 K_{IC} 값을 재료별, 온도별로 보여주고 있다. Table 7은 LV 폴리머가 사용된 HMA와 WMA, Table 8은 SB 폴리머가 사용된 HMA와

Table 5. Optimum asphalt content (OAC) and 4 properties in mix-design criteria of asphalt mixtures

Polymer	Mix type	Mix	OAC (%)	Mix-design criteria			
				Air void (%)	VMA (%)	VFA (%)	SD (Mpa)
				4 ± 1.0	≥ 14.0	65~80	≥ 3.2/4.25*
None	HMA	HAP0	5.71	3.74	16.9	80.2	3.54
	WMA	WAPE	5.63	3.63	17.9	79.1	3.67
	Mean		5.67				3.61
LV	HMA	HLV0	5.78	3.67	17.1	79.5	4.29
	WMA	WLVE	5.74	3.84	17.9	78.6	4.30
	Mean		5.76				4.30
SB	HMA	HSB0	5.81	4.01	17.5	77.1	4.66
	WMA	WSBE	5.87	3.93	17.5	77.5	4.49
	Mean		5.84				4.48

*For secondary road: SD ≥ 3.2 MPa, and for first class road: SD ≥ 4.25 MPa.

Table 6. 3PB test result and KIC for HMA and WMA normal asphalt mixtures

Polymer	Mix Type	Binder	Temp (°C)	W (mm)	ao (mm)	B (mm)	Pi (N)	δ_1 (mm)	Pmax (N)	δ_{max} (mm)	σ_n (MPa)	K_{IC} (MPa.m0.5)
None	HMA	HAP0	-5	69.03	13.33	56.53	2,849	1.05	3,016	1.12	7.23	1.627
			-15	68.41	13.40	56.91	2,959	1.11	3,175	1.31	7.75	1.791
			-20	69.03	13.80	57.30	2,528	1.06	3,025	1.36	7.28	1.760
			-25	70.50	13.55	57.00	2,822	1.11	3,060	1.25	6.96	1.564
			-35	70.33	13.37	58.53	2,627	1.17	2,848	1.25	6.30	1.383
	WMA	WAPE	-5	68.03	13.27	56.83	2,563	1.06	2,774	1.24	6.84	1.564
			-15	68.55	13.97	57.33	2,670	1.03	3,048	1.23	7.50	1.881
			-20	66.80	13.63	59.30	2,480	0.99	2,928	1.36	7.34	1.826
			-25	68.30	13.57	57.50	2,492	0.81	2,748	1.10	6.71	1.595
			-35	69.75	13.10	60.25	2,468	0.66	2,929	0.96	6.37	1.356

Table 7. 3PB test result and KIC for HMA and WMA LVM asphalt mixtures

Polymer	Mix Type	Binder	Temp (°C)	W (mm)	ao (mm)	B (mm)	Pi (N)	δ_1 (mm)	Pmax (N)	δ_{max} (mm)	σ_n (MPa)	K_{IC} (MPa.m0.5)
LVM	HMA	HLV0	-5	68.23	13.17	55.27	2,809	1.02	3,095	1.13	7.77	1.738
			-15	68.27	13.53	59.60	2,692	1.11	3,325	1.29	7.83	1.852
			-20	68.81	13.77	60.03	2,922	0.90	3,331	1.20	7.70	1.864
			-25	67.01	13.40	56.33	2,027	0.78	2,557	1.18	6.64	1.588
			-35	68.96	13.10	58.20	2,476	1.06	2,656	1.15	6.15	1.336
	WMA	WLVE	-5	68.03	13.67	55.80	2,457	0.88	2,781	1.18	7.09	1.723
			-15	68.27	13.57	55.07	2,560	0.68	2,963	1.11	7.56	1.799
			-20	68.03	13.33	58.03	2,766	0.66	3,227	1.09	7.81	1.802
			-25	68.23	13.50	56.40	2,734	0.89	3,061	1.17	7.62	1.795
			-35	68.53	12.73	54.47	2,547	0.61	2,845	0.92	7.05	1.455

Table 8. 3PB test result and KIC for HMA and WMA SBS asphalt mixtures

Polymer	Mix Type	Binder	Temp (°C)	W (mm)	ao (mm)	B (mm)	Pi (N)	δ_1 (mm)	Pmax (N)	δ_{max} (mm)	σ_n (MPa)	K_{IC} (MPa.m0.5)
SBS	HMA	HSB0	-5	68.23	13.00	55.20	2,546	1.13	2,855	1.25	7.13	1.551
			-15	68.73	13.67	55.70	2,461	0.91	2,928	1.21	7.29	1.742
			-20	67.63	13.40	58.47	2,543	0.90	2,879	1.19	7.04	1.658
			-25	68.73	13.25	54.50	2,619	1.12	2,870	1.34	7.19	1.610
			-35	68.95	13.23	56.07	2,500	1.06	2,797	1.15	6.75	1.499
	WMA	WSBE	-5	71.73	14.33	55.83	2,919	1.09	3,156	1.18	7.21	1.771
			-15	71.40	13.80	55.47	2,971	0.81	3,438	1.11	7.85	1.796
			-20	68.43	13.63	58.20	2,710	0.75	3,025	1.15	7.28	1.741
			-25	71.20	13.10	56.43	3,381	1.05	3,662	1.11	8.08	1.660
			-35	69.77	12.67	59.33	3,205	1.11	3,537	1.15	7.69	1.520

WMA의 3PB 시험 결과를 5개의 온도에서 보여주고 있다. σ_n 값은 공칭 휨 응력으로 $3SP_{max}/(2BW^2)$로 구하여진다.

한편 WMA는 같은 온도에서 K_{IC} 수준을 높여 저온파괴에 강한 혼합물이 만들어주는 효과를 보임을 확인하였다. 이를 더 구체적으로 보기 위하여 모든 HMA와 WMA의 K_{IC} 평균으로 그린 Fig. 3에서 이를 명확히 확인할 수 있다. 이 두 곡선의 값들은 일반은 물론 개질 혼합물도 포함하여 평균을 낸 것으로, 정점 부근에서의 K_{IC} 수준이 HMA mean과 비교하여 WMA mean이 0.1 MPa. $\sqrt{m}$ 이상 높은 것을 확인할 수 있다.

또한, 모든 온도에서 WMA의 평균이 0.05MPa. $\sqrt{m}$ 이상 높아 WMA가 전반적으로 저온파괴 저항성이 더 큼을 확인할 수 있었다.

한편 앞서 분석한 대로 PG 76-22 개질 아스팔트가 일반 PG 64-22 일반 아스팔트보다 더 낮은 저온에서 K_{IC}가 강하게 나타난 점은 흥미로운 결과이다. 왜냐하면, 두 바인더의 차이는 고온등급 온도의 차이이고, 저온 등급은

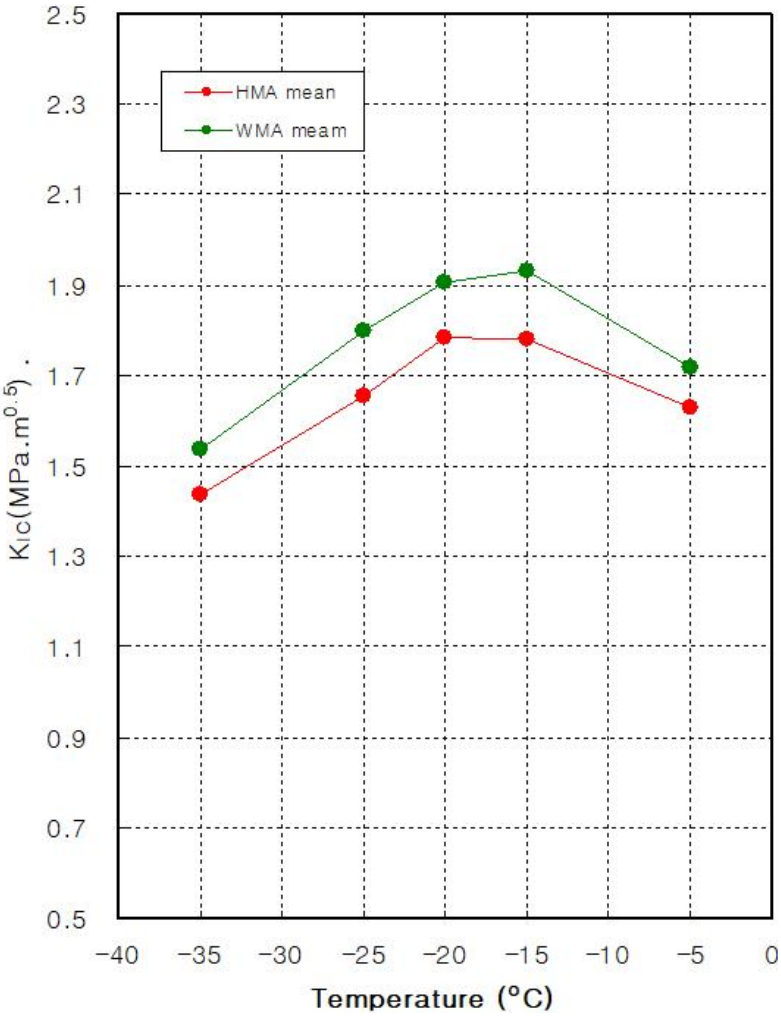

Fig. 3. Comparison of mean KIC values for HMA and WMA mixes

둘 다 "-22"로 같기 때문이다. 저온 PG등급은 모두 같으나 고온 PG등급이 76인 개질 아스팔트 혼합물이 PG등급이 64인 일반 아스팔트 혼합물보다 더 우수하게 나타나는 것이 흥미로운 점이다. PG 고온 등급은 고온에서의 강성 유지를 통해 소성변형 등의 저항성에 유리함을 발휘하기 위한 특성인데 이 수치가 높은 것이 저온에서 유리하게 나타난다는 점은 향후 좀 더 관심 있게 연구해 볼 필요가 있는 점이라 할 수 있다.

3.3.2 노화량(AQ)

노화는 아스팔트의 유변학적 특성에 영향을 미치며, 포장 성능저하의 원인이 된다. 아스팔트 혼합물은 제조와 운반, 시공과정에서는 가열 온도와 시간, 사용 장비에 따라 단기노화(Short-Term Aging : 이하 STA로 표기함)가 발생하는데, 점도가 증가하고, 강성이 증가하는 과정을 의미한다(김광우 등, 2005; Kim et al., 2016a). 시공 후 공용 중에는 강렬한 햇빛, 일산화 탄소 등 다양한 원인에 의해 장기적으로 노화(Long-Term Aging : 이하 LTA로 표

기함)가 진행된다. 특히 혼합물 제조 및 운반시 고온의 골재와 혼합되는 아스팔트 바인더가, 짧은 운반시간 동안 얇은 박막의 형태로 공기 중에 노출되어 산화작용으로 단기간에 급격한 노화가 발생한다. LTA는 상대적으로 낮은 온도에서 오랜 기간 동안 사용 중인 도로환경에 노출되면서 발생된다. 포장의 공극과 주변 환경 조건 (교통 및 기후조건 등)에 따라 노화도가 달라진다.

또한, 아스팔트 혼합물은 시공을 위하여 현장에 도착하는 순간 이미 운반시간에 따른 단기 노화가 진행되어 있으므로 시공전에 노화 정도를 바로 확인하여 사용 유무를 판단할 수 있다면 경제적인 손실을 많이 줄일 수 있을 것이다. Jeong et al.(2017)에 따르면 이전 연구결과 아스팔트 혼합물의 단기노화는 공용수명과 깊은 상관성이 있고, 포설 전 과도한 온도에서 발생한 심각한 단기노화는 노화가 일정 부분 진행된 상태에서 공용이 시작되므로 수명에 부정적인 영향을 미친다. 따라서 아스팔트 혼합물 제조 시 골재 가열 및 혼합, STA 온도는 매우 중요하다. 아스팔트 포장의 STA 온도와 시간의 함수로 표현되는 노화량(aging quantity : 이하 AQ로 표기함) 개념을 도입하여 STA를 정량화하고, 표준 STA 온도 및 시간을 제시하였다(Jeong et al., 2017; Kim et al., 2019; An et al., 2021).

$$AQ = t^{0.7436} e^{0.0334T} \tag{1}$$

AQ = 노화량 (°C.min), t = 노화 시간(min), T = 노화온도 (°C)

이러한 아스팔트 노화의 속도와 정도는 아스팔트 화학조성, 종류, 골재원 및 종류, 공극률, 투수성 여부 및 아스팔트 필름두께 등에 영향을 받으며, 많은 영향요인 중에서 온도와 시간에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(김광우 등, 2005; Morian et al., 2013; Kim et al., 2015, 2016a, 2016b, 2018; Sirin et al., 2018; Kim et al., 2019).

이 연구의 결과와 같이 WMA 혼합물의 저온 K_{IC}와 FE가 우수하게 나타나는 것은 두 가지 측면에서 이유를 분석할 수 있을 것이다. 한 가지는 WMA 첨가제가 HMA 혼합물보다 30°C 정도 낮은 온도에서도 workability를 확보하기 위하여 바인더를 묽게 만드는 효과가 있다는 점이다. 하지만 이것도 여전히 고온인 100°C 이상에서의 효과를 얻기 위한 것인데, 그 효과가 저온일 때도 나타나는지는 불확실하다. 왜냐하면 BBR을 이용한 PG 저온등급 시험에서 WMA 바인더의 저온 통과온도가 HMA 바인더와 거의 차이가 없기 때문이다. 다른 한 가지는 WMA 혼합물의 가공온도나 STA 온도가 낮아 혼합물 내의 바인더가 덜 노화된다는 점이다. 아스팔트 포장은 바인더의 AQ에 따라 강성이 커지고 이것이 저온에서는 취성으로 나타나서, 노화가 많이 된 혼합물일수록 저온파괴에 취약해지기 때문이다.

일반적으로 개질 아스팔트는 180°C 전후로 일반 아스팔트의 160°C 전후보다 20°C가량 높은 온도로 생산된다. 따라서 플랜트에서 출하된 혼합물은 트럭으로 운반·대기 중에 STA되며 온도가 높을수록, 그리고 시간이 길어질수록 AQ가 증가하게 된다. 따라서 실험실에서의 혼합물 제조는 이를 모사하기 위하여 현장여건과 유사한 온도와 시간을 적용하여 혼합물을 STA 시킨 후 제조한다. 그리고 이렇게 STA된 혼합물의 AQ 측정을 위해서는

바인더를 혼합물로부터 추출 회수하여 절대점도나 강성지수 등을 측정해야 한다.

이 연구에서는 혼합물별로 적용된 STA 온도와 시간으로 식 (1)에 제시된 AQ 모델을 이용하여 AQ를 산정하고 이것이 K_{IC}와 어느 정도 상관관계가 있는지 분석하였다. 5가지의 온도에서 측정된 K_{IC}의 값을 보면 -5°C와 -35°C의 값들은 혼합물의 종류와 관계없이 모두 비슷하게 나타나고 있다. 또한 -25°C의 값도 대부분 이미 기울어진 곡선상에 있어 바인더의 AQ와 상관성이 낮게 나타났고, 재료의 특성을 가장 잘 나타내는 수치는 -15°C와 -20°C인 것으로 판단되었다.

Table 9는 이 연구에 사용된 바인더의 AQ를 추정하기 위하여 Table 4에서 제시한 STA에 적용된 온도와 시간을 식 (1)에 대입하여 노화량인 AQ를 "°C.min" 단위로 계산하였다. 그리고 각 재료별 -15°C와 -20°C에서의 K_{IC}를 가지고 폴리머별로 적용 온도가 다르므로 같은 폴리머 내의 K_{IC} mean에서 보듯이 고온 노화로 AQ가 7,000~8,000대로 크게 나타나는 HMA의 K_{IC}가 노화로 인하여 AQ가 3,000~4,000대인 WMA의 K_{IC}보다 낮게 나타남을 알 수 있다.

3.3.3 상관성 분석

각 재료별 -15°C와 -20°C에서의 K_{IC}를 가지고 폴리머별로 적용 온도가 다르므로 같은 폴리머 내에서 평균값인 K_{IC} mean과 AQ로 회귀분석을 수행하였다. 그 이유는 -5°C에서는 K_{IC}가 재료의 특성과 관계없이 대부분 유사하고, -25°C 또는 -35°C에서는 K_{IC}가 DTC의 영향으로 약해져 재료(바인더)의 특성을 제대로 나타내지 못하므로 회귀분석에서 R^2값이 매우 낮았다. 따라서 재료의 특성을 비교적 잘 반영하는 온도인 -15°C와 -20°C에서의 K_{IC}를 가지고 회귀분석을 수행한 것이다. 회귀분석 모델은 Mean K_{IC} = f(AQ)로서 그 결과는 Figs. 4, 5와 같다.

Fig. 4의 회귀분석에서 독립변수 x는 둘 다 Table 10의 AQ로 놓고, -15°C회귀 곡선의 종속변수는 -15°C (y_{-15})로, -20°C 회귀곡선의 종속변수는 -20°C(y_{-20})으로 회귀분석을 수행한 것이다. 또한, Fig. 5의 회귀분석은 두 온도의 K_{IC}를 평균을 내고 해당 각 AQ에 해당하는 K_{IC}를 모두 평균 내어 작성한 Table 10의 x와 y로 수행한 것이다. Fig. 4에서 보듯이 K_{IC}와 AQ 간에 −15°C에서는 $R^2 \geq 0.62$, -20°C에서는 $R^2 \geq 0.51$의 결정계수를 보여 어느 정도 상관관계가 있음을 보여준다.

Table 9. Short-term aging condition and KIC by mixture binder

Polymer	Binder	Short-term aging		AQ* (°C.min)	K_{IC} by temperature		K_{IC} mean by AQ	
		Temp. (°C)	time (min)		-15°C	-20°C	-15°C	-20°C
None	HAP0	160	60	4,396.5	1.791	1.762	1.791	1.762
	WAPE	135	120	3,193.8	1.881	1.826	1.918	1.848
LV	HLV0	170	60	6,139.8	1.852	1.864	1.852	1.864
	WLVE	145	120	4,460.3	1.799	1.802	1.934	1.889
SB	HSB0	180	60	8,574.6	1.742	1.658	1.742	1.658
	WSBE	145	120	4,460.3	1.796	1.741	1.918	1.855

*computed by Eqs. (4-12).

그리고 소 그룹별 평균으로 분석한 회귀곡선인 Fig. 5에서 보면 혼합물이 고온 노화로 AQ가 7,000~8,000대로 큰 HMA의 K_{IC}가 준고온 노화로 AQ가 3,000~4,000대인 WMA의 K_{IC}보다 낮게 나타나며 우하향 경향을 보여주는 것을 알 수 있다.

Table 10. AQ by short-term aging condition and mean KIC by binder group

Mix type	Polymer	Binder	Short-term aging		AQ (°C.min) (x)	Mean K_{IC} of two temperatures (y)
			Temp. (°C)	time (min)		
HMA	None	HAP0	160	60	4,397	1.777
WMA		WAPE	135	120	3,194	1.883
HMP	LV	HLV0	170	60	6,140	1.858
	SB	HSB0	180	60	8,575	1.700
WMA	All polymer	All WMA PMA	145	120	4,460	1,929

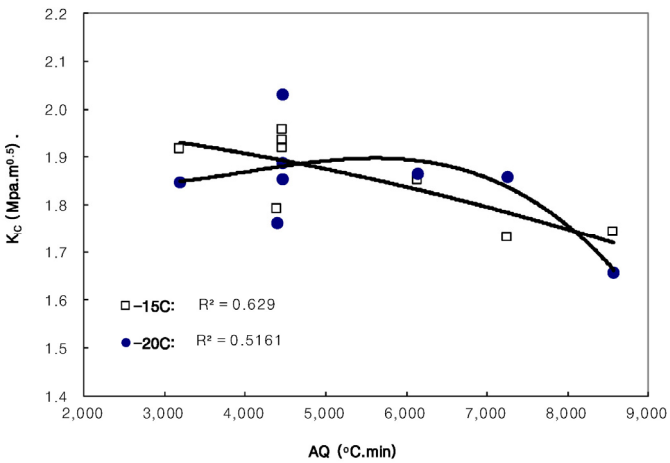

Fig. 4. Regression analyses between mean K_{IC} and AQ

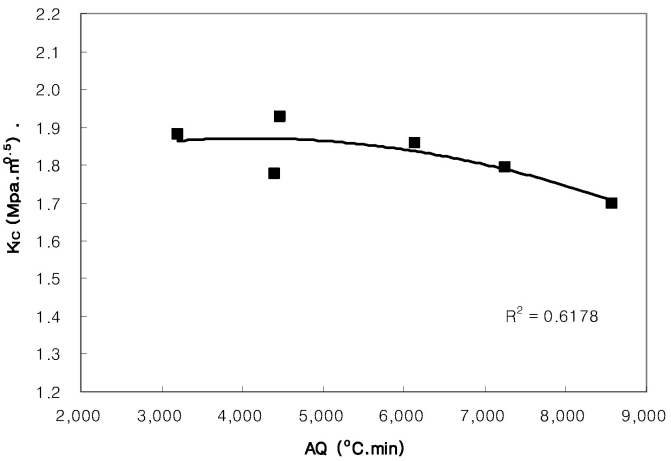

Fig. 5. Regression analyses between mean K_{IC} by binder group and corresponding AQ values

4. 결 론

본 연구에서는 동일한 저온에서 특성을 비교하기 위하여, 개질 폴리머로는 LVM, SBS를 사용하고, WMA 첨가제로는 K-Peal(KP)와 Evotherm(ET)를 사용하였으여, 12종류의 바인더로 13 mm 밀입도 HMA와 WMA 콘크리트를 제조하였다. WMA 콘크리트의 기본 특성을 측정하기 위하여 3점 휨강도 시험을 실시하였으며, 이를 파괴인성 및 노화량를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 저온에서 측정된 폴리머 아스팔트 혼합물의 σ_n은 -20°C나 -25°C에서 가장 높았으나, 일반 아스팔트 혼합물은 -15°C에서 가장 높은 것으로 나타났으며, 재료별 차이는 있지만 K_{IC}는 -15°C~-25°C 사이에서 정점을 이루었다가 다시 낮아지는 경향을 보였다.
2. 폴리머에서는 LVM이 -20°C에서는 KIC가 SBS보다 좀 더 우수한 것으로 나타났으나, 폴리머 자체보다는 사용된 WMA 첨가제에 따라 영향을 많이 받기 때문에 중온 첨가제와 폴리머의 적절한 조합이 중요함을 알 수 있었다.
3. 파괴인성과 노화량의 상관성 분석에서는 WMA의 K_{IC}가 높은 것이 노화가 덜 되기 때문이라는 것을 어느 정도 확인할 수 있었다.

하지만 본 연구 결과는 매우 제한적인 data에 근거한 것이며 R^2의 값도 0.6수준이다. 따라서 이는 구체적 결과라 할 수는 없으며 향후 개질제 및 첨가제 등을 다변화하여 심도 있는 연구를 통해 결론을 도출해야 할 것으로 사료 된다.

참고문헌

국토교통부 (2021a). 국도건설 설계 실무요령.

국토교통부 (2021b). 아스팔트 콘크리트 포장시공지침.

권승준, 김광우, 도영수, 이상범 (1999). “폴리머개질 아스팔트 콘크리트의 푸아송비에 관한 실험적 연구”, 한국농공학회 논문집, 41(5), pp. 104-111.

김광우, 홍상기, 이기호, 도영수 (2005). “가열 재생혼합물의 노화특성 개선을 위한 연구”, 한국도로학회 논문집, 7(1), pp. 1-9.

최정순, 김성운, 김광우 (2012). “Variation of flexural strength of warm-mix asphalt concretes due to differential thermal contraction at low temperatures”, Journal of Korean Society of Road Engineers, 14(4), pp. 63-72.

홍준표 (2012). “준고온 아스팔트 콘크리트의 저온 파괴특성”, 박사학위논문, 강원대학교대학원, 지역기반공학과.

An, S.Y., Jo, Y.G., Park, T.S. Kim, K.W. and Kim, S.U. (2021). “Modeling of Asphalt Aging Based on Short-Term Aging Temperature and Time of Normal Asphalt Mixture for Quantifying Binder Aging”, International Journa of Civil Engineering. https://doi.org/10.1007/s40999-021-00651-7

El Hussein, M. and Halim, A.O.A. (1993). “Differential thermal expansion/contraction-a mechanical approach to

adhesion in asphalt concrete", Canadian Journal of Civil Engineering, 20(3), pp. 366-373.

El Hussein, M., Kim, K.W. and Phonia, J. (1998). "Asphalt concrete damage associated with extreme low temperatures", Journal of Materials in Civil Engineering, 10(4), pp. 269-274.

Evotherm (2021). https://www.ingevity.com/products/evotherm/, accessed Jan. 2021.

Jeong, S., Kim, Y., Dong, B. and Kim, K.W. (2017), "Quantifying model for short-term aging of hot-mix asphalt mixture", Proceedings in USB, 10th International Conference on Road and Air field Pavement Technology, (10th ICPT 2017), Hong Kong Polytechnic University, 8-10 Aug. 2017.

Karihalroo, B.L. and Nallathambi, P. (1989). "An improved effective crack model for the determination of fracture toughness of concrete", Cement and Concrete Research, 19, pp. 603-610.

Karihalroo, B.L. and Nallathambi, P. (1990). "Effective crack model for the determination of fracture toughness (KIC) of Concrete", Engineering Fracture Mechanics, 35(4-5), pp. 637-645.

Kim, K.W. and El Hussein, M. (1995). "Effect of differential thermal contraction on fracture toughness of asphalt materials at low temperatures", Journal of AAPT, 66, pp. 474-499.

Kim, K.W. and El Hussein, M. (1997). "Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures", Construction and Building Materials, 11(7-8), pp. 403-411.

Kim, K.W., Kweon, S.J., Doh, Y.S. and Park, T.S. (2003). "Fracture Toughness of Polymer-modified Asphalt Concrete at Low Temperatures", Canadian Journal of Civil Engineering, 30(2), 406-413.

Kim, K.W., Doh, Y.S. and Lim, S. (1999). "Mode I reflection cracking resistance of strengthened asphalt concretes", Construction and Building Materials, 13(5), pp. 243-251.

Kim, S., Choi, H.J. and Kim, K.W. (2013). "Evaluation of tensile property of warm-mix asphalt concretes at low temperatures", Paper presented at 92nd TRB Meeting, Washington, DC, Jan. pp. 13-17.

Kim, S., Lee, D.H., Lee, S.T., Kim, Y.S. and Kim, K.W. (2015). "Evaluation of aging level of asphalt mixture at pothole site", Journal of Korean Asphalt Society, 5(1), pp. 18-26.

Kim, S., Lee, S.H., Kwon, O., Han, J.Y., Kim, Y.S. and Kim, K.W. (2016a). "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), pp. 153-167.

Kim, S., Park, J.Y. and Kim, K.W. (2012). "Tensile fracture toughness of polymer-modified warm-mix asphalt concretes", Proceedings of the 7th Asian Symposium on Polymers in Concrete, ASPIC 2012, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, Ed. by Ozkul et al., October 3-5, pp. 203-210.

Kim, S., Shen, J., Lee, S., Kim, Y. and Kim, K.W. (2019). "Examination of physical property degradation due to severe short-term aging and effect of hydrated lime as antioxidant in asphalt mixture", Road Materials and Pavement Design, 20(7), pp. 1638-1652.

Kim, S., Yun, Y.B., Lee, S.H., Han, J.H. and Kim, K.W. (2015). "Effect of production temperature on deformation and tensile-related properties of modified warm-mix asphalt concretes", Paper presented at 94th TRB Meeting, Washington, DC, Jan. pp. 11-15.

Kim, Y., Yun, J., Jeong, S. and Kim, K.W. (2016b). "Analysis of binder aging levels in asphalt mixture caused by short-term aging conditions using GPC technique", International Journal of Highway Engineering, 18(3), pp. 1-9.

Kim, Y.S., Dong, B.S., Kim, S., Jo, J.W. and Kim, K.W. (2018). "Prediction of short-term aging level by aging quantity model using time and temperature of hot-mix asphalt", Proceedings of 5th International

Conference on Road and Rail Infrastructure, CETRA 2018, May 17-19, Zadar, Croatia.

NOLAN, K., Simon, A.M. HESP and Simon, A.M. (1994). “LOW-TEMPERATURE FRACTURE TOUGHNESS OF POLYETHYLENE-MODIFIED ASPHALT BINDERS”, Asphalt Concrete Mix Materials Transportation Research Record, 1436, pp. 54-59.

Mead West va co Asphalt Innovations (MWV) (2012). VA Richmond, http://www.mwv.com

Mihai O. Marasteanu, Shongtao Dai, Joseph F. Labuz and Xue Li (2002). “Determining the Low-Temperature Fracture Toughness of Asphalt Mixtures,” Journal of the Transportation Research Board, January 1, 2002 Research Article https://doi.org/10.3141/1789-21.

Morian, N., Hajj, E.Y. and Sebaaly, P.E. (2013). “Significance of mixture on binder aging in HMA mixtures”, in Proceedings of 92nd Annual Meeting of Transportation Research Record, Washington, DC, USA, January 2013.

Sirin, O., Paul, D.K. and Kassem, E. (2018). “State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives”, Advances in Civil Engineering, Volume 2018, Article ID 3428961. https://doi.org/10.1155/2018/

Yoo, M.Y., Jeong, S.H., Park, J.Y., Kim, N.H. and Kim, K.W. (2011). “Low temperature fracture characteristics of selected warm-mix asphalt concretes”, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, TRB, 2208(1), pp. 40-47.

Yun, Y.B., Lee, M.S., Jeong, S.H., Lee, S., Kim, S., Lee, S.J. and Kim, K.W. (2014). “Rut-related performance of polymer-modified WMA mixture in comparison with tensile property”, Proceedings in USB, International Symposium on Advanced Technologies in Asphalt Pavement, Chuncheon, Korea, Sept. 2014.