

저온하에서 시차열 수축에 의한 WMA 콘크리트의 휨강도 변화

Variation of Flexural Strength of Warm-mix Asphalt Concretes Due to Differential Thermal Contraction at Low Temperatures

최정순 Choi, Jung Soon
김성운 Kim, Sung Un
김광우 Kim, Kwang Woo

강원대학교 석재복합건설신소재연구소 연구원 (E-mail : fireswing@hanmail.net)
강원대학교 지역건설공학과 박사 후 연구원 (E-mail : sungun2001@hanmail.net)
정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 (E-mail : asphaltech@hanmail.net)

ABSTRACT

PURPOSES : Hot-mix asphalt(HMA) concretes show a trend of strength increase at low temperature due to binder stiffness increase, but strength decrease below a certain low temperature. This is due to the differential thermal contraction(DTC) which is induced by a significant difference in coefficients of thermal contraction between aggregate and asphalt which is coated around the aggregate. This DTC damage is well known to occur in HMA concrete, but is not yet investigated in warm-mix asphalt(WMA) concretes.

METHODS : To evaluate DTC damage on WMA in this study, the flexural strength(s_f) of WMA concretes, which were produced at 30~40°C lower temperature, was evaluated in comparison with that of HMA at -5, -15 and -25°C.

RESULTS : Most of WMA and HMA mixtures showed flexural strength increase down to -15°C and decrease below -15°C. this type of strength reduction below -15°C can be explained as the effect of differential thermal contraction that is a consequence of the large difference in coefficients of thermal contraction between aggregate and asphalt. the property reduction of WMA is similar the result of previous works dealt with HMA mixtures.

CONCLUSIONS : Even though there is some differences by materials used, the WMA concretes showed a significantly lower DTC damage than HMA concrete at low temperature at $\alpha=0.05$ level.

Keywords

DTC(differential thermal contraction), WMA(warm mix asphalt), HMA(hot mix asphalt), low temperature, flexural strength

Main Author : Kim, Kwang Woo, Professor
Department of Regional Infrastructures Engineering,
Kangwon National University, ChunCheon, 200-701, KOREA
Tel : +82.33.250.6467 Fax : +82.33.251.1518
email : asphaltech@hanmail.net

International Journal of Highway Engineering
<http://www.ksre.or.kr/>
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

화석연료 사용의 증가는 이산화탄소(CO₂) 발생량을 증가시켜 지구 온난화의 문제를 야기하고 있다. 이에 따른 기후 변화로 많은 피해가 발생되고 있으며 환경 보존에 대한 근본적인 대책의 일환으로 세계적인 CO₂ 발생

량 저감노력이 모든 산업분야에서 이루어지고 있다.

도로분야에서는 이에 대한 노력의 일환으로 고온으로 가열하여 제조하던 아스팔트(Hot-mix asphalt : HMA) 혼합물을 그 보다 좀 낮은 온도인 준고온에서 제조하는 아스팔트(Warm mix asphalt : WMA) 포장기

술이 개발되었다(이문섭 등 2011, 황성도 2011, Yoo et al. 2011). 이 기술은 연료절감과 CO₂ 배출량 감소로 각광을 받으며, 또한 조기 교통 개방으로 인한 차량의 정체 감소에 따른 유류비 절감과 매연 감소 등의 사회간접 비용을 낮추는 효과가 있는 것으로 기대되고 있다.

이러한 WMA 포장 재료에 대해 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 소성변형 등 고온 특성에 대한 연구는 다양하나 저온 특성에 대한 연구는 적다. 하지만 전 세계적으로 인구밀집지역인 온대 및 한대지역은 동절기 저온에 장기간 노출되는 아스팔트 포장이 많아 WMA 콘크리트가 저온에서 어떠한 특성을 보일지에 대한 연구가 필요하다.

저온에서 아스팔트 바인더는 취성이 매우 커져 충격에 파괴되기 쉽고 여러 가지 손상이 발생된다(Anderson and Hahn 1968, Fabb 1974, Hass 1973, Kandhal 1980, Kim 1995). 또한 골재와 혼합하여 다져진 HMA 콘크리트는 -15~-20℃ 이하에서 시차열 수축(Differential thermal contraction : DTC)에 의해 내부에 흠(Flaw)이 발생하여 강도가 약해지는 문제가 있다. 즉, 저온에서 DTC에 의해 자체적으로 혼합물 내부에 미세균열(Hairline crack)이 발생되고 이는 하중 재하 시 균열 발생의 근원이 되거나 균열 진전의 통로를 제공하여 더 취약해진다(CGRA 1971, El Hussein and El Halim 1993, Kim and El Hussein, 1995, 김광우 등 1995).

그간 이 분야의 연구는 HMA 콘크리트에 대해서 수행되었으나 상대적으로 낮은 온도에서 제조된 WMA는 어느 정도나 DTC의 영향을 받을지 아직 연구된 바가 없다. 즉, 고온에서 충분히 건조된 골재에 비해 준고온에서 상대적으로 덜 건조된 골재 때문에 코팅력에 차이가 있어 WMA 콘크리트는 DTC의 영향이 더 심각할 수도 있다. 하지만 WMA는 덜 가열된 골재에 바인더가 코팅되므로 상대적으로 단기노화 정도가 낮아 오히려 그 반대일 수도 있을 것이다. 따라서 DTC의 발생온도인 -15~-20℃는 한반도 중부에서 처할 수 있는 온도이므로 이의 확인을 위해 체계적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 밀입도 WMA 콘크리트의 DTC 영향을 아스팔트 포장체에 중요한 강도특성 중 하나인 휨강도의 변화를 통하여 HMA와 비교·평가하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 밀입도 아스팔트 콘크리트 보(beam)를 제조하고 이를 3점 휨 시험방법으로 휨강도(Flexural strength : S_f)를 3가지 저온(-5, -15, -25℃)에서 측정하였다.

2. 시차열 수축

아스팔트 콘크리트의 인장강도는 -15~-20℃ 정도 내려갈 때까지는 계속 증가한다(Fig. 1). 이는 온도가 낮아지며 골재보다 열 수축계수(Coefficient of thermal contraction)가 큰 바인더가 응축되며 혼합물의 결속력이 커져 하중에 대한 저항성이 증가하기 때문이다. 하지만 온도가 그보다 더 내려가면 강도가 다시 저하되는 현상을 보인다. 이는 아스팔트와 골재의 열 수축계수가 약 60배 차이(El Hussein et al. 1998)가 나므로 골재를 둘러싸고 있는 아스팔트 매트릭스(asphalt-filler mix)가 수축될 때 골재는 상대적으로 덜 수축되는 시차열 수축(DTC)으로 인해 미세균열이 발생하기 때문이다(Fig. 2).

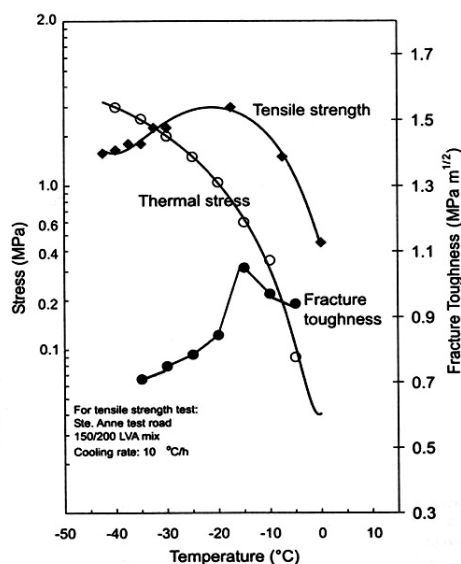


Fig. 1 Typical Tensile Strength and Thermal Stress-temperature Relationship(CGRA 1971), and Fracture Toughness-temperatures Relationship (Kim et al. 2003)

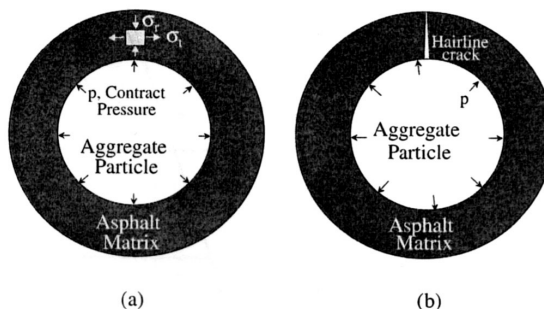


Fig. 2 Schematics of (a) Tangential Stress σ_t and Radial Stress σ_r , and (b) a Hairline Crack in an Aggregate-matrix System Associated with DTC(after El Hussein et al. 1998)

즉, 아스팔트 콘크리트의 인장강도는 Fig. 1과 같이 $-15\sim-20^{\circ}\text{C}$ 정도까지는 증가하나 -20°C 이하에서는 낮아져 내부에 응축되는 수축응력이 인장강도보다 더 커짐으로써 파괴가 발생하여 미세균열이 형성된다. 이러한 이유 때문에 파괴인성(Fracture toughness)도 인장강도와 비슷한 온도에서 정점을 이루고 강하되는 것을 볼 수 있다. 저온에서 DTC의 발생 사실이 아스팔트 콘크리트의 박리, 음파 탐지 및 절단면의 현미경 조사 등을 통해 구명됨으로써 파괴인성의 저하 원인이 입증되었다(김광우 1995, Kim and El Hussein 1997, El Hussein et al. 1998). 따라서 이의 발생을 줄일 수 있는 재료의 사용이 포장의 장기 수명 유지에 필요하며 일부 재료에 대한 비교연구를 통해 특정 폴리머 개질 아스팔트가 효과적인 수도 있음을 보여주었다(권승준 1999, Kim et al. 2003).

3. 재료 및 방법

3.1. 사용재료

아스팔트는 침입도 60~80(PG64-22, 세칭 AP5)을 사용하였고, 준고온화 첨가제(WMA additive)로 Evotherm(ET)과 Wax compound(WC)를, 개질재로는 LVM과 SBS를 사용하였다. ET는 미국 Meadwestvaco Asphalt Innovations사의 액상제품으로 플랜트에서 바인더에 투입하여 사용하는 WMA 첨가제이다. WC는 Paraffin 왁스, EB 왁스(Ethylene bis stearamide)와 Bio oil을 합성하여 국내에서 개발한 재료이다. Paraffin 왁스는 탄소(C)수 20~36개의 직쇄포화탄소수가 주성분이고 양초제조 등에 사용된다. Eb 왁스는 고용점의 합성 왁스로서 바인더 강성향상용으로 사용하였다. Bio oil은 식용유 등과 같은 식물성 기름이다. 개질재는 고온변형 저항성과 저온 균열저항성 증진을 위해 저밀도 폴리에틸렌(LDPE: Low-density polyethylene), EVA(Ethylene vinyl acetate), EPDM(Ethylene propylene diene monomer rubber)을 혼합한 것과 SBS(Styrene butadiene styrene)를 사용하였다. LDPE는 비교적 고온 분말이며 밀도가 $0.910\sim0.925\text{g}/\text{cm}^3$ 인 분자구조가 가장 간단한 수지 중의 하나다. EVA는 케미컬 분쇄법에 의해 제조한 에틸렌 식초 비코폴리머의 미분말パウ더로 밀도는 $0.922\text{g}/\text{cm}^3$ 이며 MI는 $75\text{g}/10\text{min}$, 용점은 98°C 이다. 이와 함께 에틸렌, 프로필렌과 디엔을 삼원 공중합한 열가소성합성고무인 EPDM을 사용하였다. EPDM은 -40°C 까지도 유연성을 유지하며 비중은 0.87 정도이다. 그러므로 LDPE와 EVA 그리고 EPDM을 적정 비율로 혼합하여

사용하였으며 이를 LVM으로 명명하였다.

SBS는 고무의 특성을 가지고 있는 폴리머로서 소성 변형 등 바인더의 stiffness 향상을 위하여 가장 많이 사용되는 소재이다. Fig. 3은 준고온화 첨가제, Fig. 4는 개질재의 사진을 보여주고 있다. Table 1은 본 연구에서 수행한 준고온화 첨가제 및 개질재에 대한 설명이다.

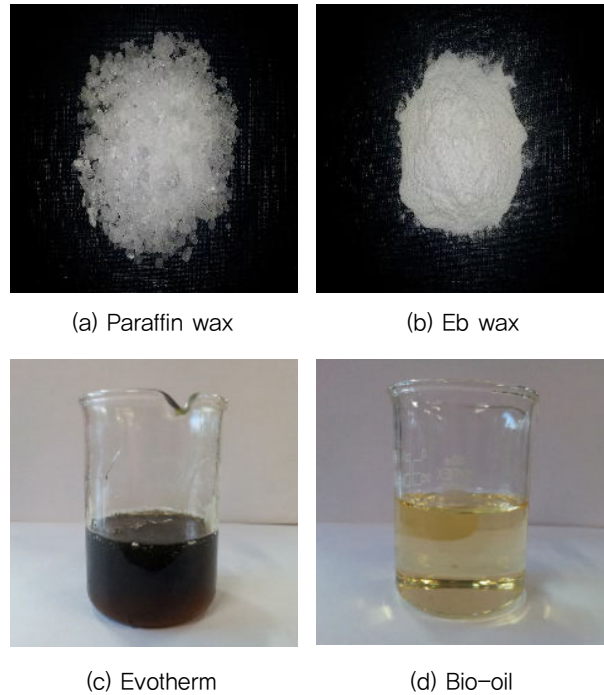


Fig. 3 Photographs Showing

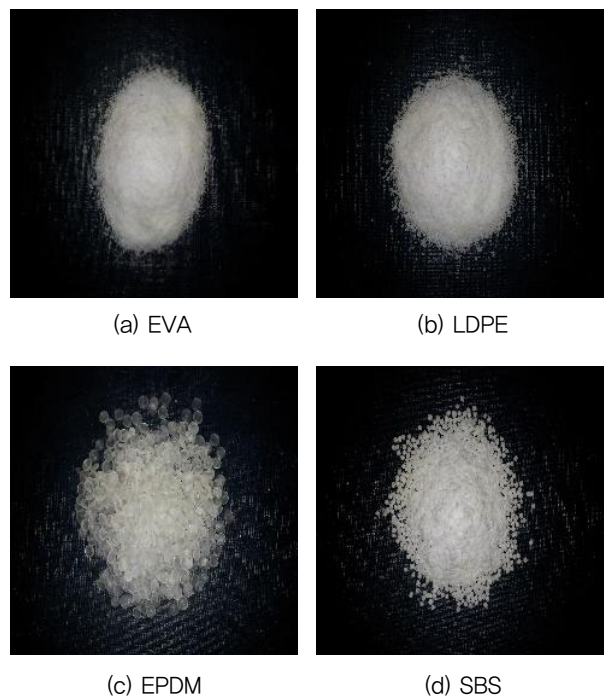


Fig. 4 Photographs Showing

Table 1. Designation of Each Binder and Description

Classification		Binder	Base Asphalt	Polymer and Content	WMA Additive and Content
H M A	Normal	AP0	Pen 60-80 (AP5)	None	None (0)
	PMA	LVO	Pen 60-80 (AP5)	LVM 4.8%	None (0)
		SBO	Pen 60-80 (AP5)	SBS 4%	None (0)
W M A	Normal	APE	Pen 60-80 (AP5)	None	ET 0.5%
		APW	Pen 60-80 (AP5)	None	WC 1.8%
	PMA	LVE	Pen 60-80 (AP5)	LVM 4.8%	ET 0.5%
		LVW	Pen 60-80 (AP5)	LVM 4.8%	WC 1.8%
		SBE	Pen 60-80 (AP5)	SBS 4%	ET 0.5%
		SBW	Pen 60-80 (AP5)	SBS 4%	WC 1.8%

본 연구에서는 화강암의 쇄석을 굵은 골재와 부순 잔 골재(Screenings)로, 채움재(Mineral filler)는 석회석 분을 사용하였다. 골재의 물리적 성질을 KS 시험법에 따라 측정하여 Table 2에 보여주며, Fig. 5는 사용된 골재의 합성입도이다.

Table 2. Property of Aggregates

Classification		Apparent Specific Gravity	Absorption	Abrasion
Specification		>2.45	<3.0%	<35%
Granite	13mm	2.849	0.728	19.7
	Screenings	2.669	1.225	-
Filler		2.75	-	-

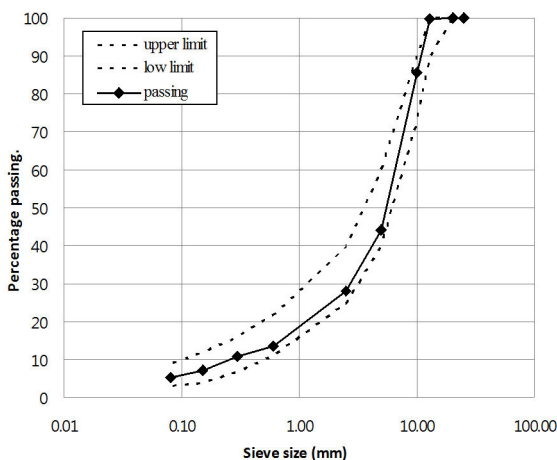


Fig. 5 Gradation Curve of WC-6(13R, 국토해양부 2009)

3.2. 시험방법

3.2.1. 준고온 바인더의 제조 및 시험

WMA 혼합물 제조 시에는 아스팔트를 165℃ 오븐에 충분히 가열한 후 준고온화 첨가제인 ET 또는 WC를 넣고 스페출러로 약 3분간 저어 사용하였다.

그리고 폴리머 개질재와 같이 사용할 경우 미리 바인더에 넣은 후 폴리머를 넣고 고성능 전단 Homogenizer로 5,400rpm에서 1시간 동안 혼합시켰다.

동점도(Kinematic viscosity) 시험은 KS F 2392에 의해 수행하였다. 시료는 개질재가 첨가된 경우 175℃, 준고온화 첨가제만 사용된 경우 165℃에서 가열한 후 용기에 담아 무게를 측정하였다. 그리고 S27 스피들을 회전속도 20rpm으로 유지하여 필요한 점성 토크(torque)를 1분 간격으로 3회 측정하였다. 표준 시험 온도는 135℃이나 WMA 혼합물의 다짐 온도로 추정되는 115℃에서도 측정하였다.

동전단유동시험기(Dynamic shear rheometer : DSR)를 이용하여 바인더의 Stiffness(rutting factor)인 $G^*/\sin\delta$ 를 측정하였다. DSR 시험용 아스팔트 시료는 직경 25mm를 사용하였으며 상하 간격은 1mm를 유지하였다. 온도에 따라 아스팔트 시료가 수축하거나 팽창하여 지름 및 두께가 변하므로 시료의 두께를 고정 후의 온도 변화는 0.1℃ 이내로 하였다. 이때 PG 고온등급의 $G^*/\sin\delta$ 기준치는 Original 바인더는 1.0kPa, 단기노화(Rolling thin film oven: RTFO) 후의 바인더는 2.2kPa 이상이 되어야 한다.

Bending beam rheometer(BBR) 시험을 위해 단기노화 처리된 아스팔트를 24시간 동안 100℃에서 pressure aging vessel(PAV)을 이용하여 장기노화시켰다. 일정 저온에서 아스팔트 보(beam : 길이 125mm, 폭 12.7mm, 두께 6.35mm)에 휨 모드의 크리프 하중을 3점 휨 모드로 가하고, 온도는 메탄올(Methanol)을 채운 수조에 의해 유지하며 100g의 하중을 240초 동안 재하시켰다.

3.2.2. 배합설계

일반적으로 플랜트에서 WMA 혼합물 제조 시 아스팔트는 원활한 유동성 확보를 위해 HMA와 거의 같은 온도를 유지하고 골재만 덜 가열한다. 따라서 WMA 비개질 혼합물의 경우 골재는 135℃에서 5시간, 바인더는 160℃에서 2시간, 개질 혼합물의 경우 골재는 145℃에서 5시간, 바인더는 175℃에서 약 2시간씩 오븐에 넣어 가열하였다. 혼합물을 비빈 후 HMA와 WMA는 각각 1

시간과 2시간씩 단기 노화 후 몰드에 넣고 선회다짐기 (Superpave gyratory compactor: SGC)로 다짐을 하였다. Table 3은 혼합물별 처리 온도와 시간을 보여 준다.

Table 3. Heating and Short-Term Aging Temperature and Time for Each Mixture

Classification		Heating Temp. (°C)		Short-Term Aging	
		Binder	Agg.	Temp (°C)	Duration (hr)
HMA	Normal	165	165	160	1
	PMA	175	175	170	1
WMA	Normal	160	135	135	2
	PMA	175	145	145	2

본 연구에서는 혼합물의 최적아스팔트 함량 (Optimum asphalt content: OAC) 결정을 위하여 국토해양부(2009) 지침의 변형강도(S_b), 골재간극률(Void in mineral aggregate: VMA), 공극률(Air void: Air)과 채움률(Voids filled with asphalt: VFA)을 OAC 결정기준으로 적용하였다. 일반 도로용 아스팔트 포장의 기준치는 Air=3~5%, VFA=65~80%, $S_b \geq 3.2$ MPa, VMA=13(19mm), 14%(13mm)이다. S_b 는 Eq. (1)에 의하여 구하였다. 그리고 이 모든 기준을 만족하는 아스팔트 함량 중에서는 공극률 4%가 얻어진 아스팔트 함량을 OAC로 결정하였다. 혼합물은 선회다짐기로 100회씩 다짐하였다. HMA 일반도로용 아스팔트 콘크리트는 선회다짐 75회, 중 차량 도로(ESAL \geq 1,000)용은 100회의 다짐을 하나 WMA는 별도의 기준이 없다. 하지만 WMA는 다짐 특성이 다르기 때문에 본 연구에서는 모두 100회를 적용하였다.

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

여기서, P =Maximum deformation load(N), y =Vertical deformation(mm)이고 S_b 의 단위는 MPa이다.

3.3.3. 3점 휨 시험

배합설계를 통해 결정된 최적 아스팔트 함량을 이용하여 슬래브 공시체를 제작하였다. 롤러 컴팩터를 이용하여 두께 70mm를 기준으로 305mm \times 305mm 정사각 슬래브를 제조하여 두께를 높이($W=70$ mm)로 하고, 폭(B) 60mm \times 길이(L) 305mm의 보 공시체를 다짐 방향으로

잘랐다. 이렇게 제조된 3점 휨 시험용 보는 저온조 (Environmental chamber)에 넣어 -5, -15, -25°C에서 48시간 보관 후 바로 꺼내어 시험에 사용되었다. Fig. 6과 같이 3점(3-point bending)시험은 시간 $S=280$ mm, 기존연구(Kim and El Hussein 1995)의 정하중 재하속도 3.3mm/min을 가하여 얻어진 최대하중과 공시체 치수로 Eq. (2)를 이용하여 휨강도(Flexural strength: S_f)를 구하였다.

$$S_f = \frac{3PS}{2BW^2} \quad (2)$$

여기서, P =최대하중(N), S =지간(280mm), B =보의 폭(mm), W =보의 높이(mm)이며 S_f =휨강도(MPa)이다.



Fig. 6 3-Point Bending Test Setup

4. 결과 및 고찰

4.1. 바인더의 물리적 특성

본 연구에서 HMA 및 WMA 혼합물 제조를 위해 Table 1과 같이 각 바인더를 제조하였으며 바인더 종류별로 측정된 동점도와 PG 등급은 Table 4, 5와 같다. 표에서 보듯이 WMA Normal 바인더(APE, APW)의 동점도는 HMA Normal(AP0)에 비해 13.6~25.8% 감소하였다. 그리고 WMA PMA는 HMA PMA에 비해 동점도가 9.7~21.5% 감소하였다. WMA 첨가제의 효과를 온도별로 종합해서 보면 135°C에서 평균 14.5%보다는 115°C에서 18.6%로 동점도가 더 낮아져 WMA 다짐온도 부근에서 더 효과가 큰 것으로 나타났다. DSR의 고온 임계온도(Original과 RTFO 바인더가 모두 stiffness 기준치를 통과하는 온도)는 HMA 바인더에 WMA 첨가제가 들어가 평균 0.2°C 낮아져 거의 변화가 없이 HMA의 고온 등급을 유지하는 것을 알 수 있었다.

Table 4. Binder Property Changes by Adding WMA Additives

Classification	Designation	Kinematic Viscosity(cp)				
		115°C	Change (%)*	135°C	Change (%)*	
HMA	Normal	AP0	1,392	-	472	-
	PMA	LV0	5,644	-	1,758	-
		SB0	4,683	-	1,519	-
WMA	Normal	APE	1,083	-22.2	366	-22.5
		APW	1,033	-25.8	408	-13.6
	PMA	LVE	5,048	-10.6	1,587	-9.7
		LVW	4,517	-20.0	1,458	-17.1
		SBE	4,150	-11.4	1,417	-6.7
		SBW	3,675	-21.5	1,258	-17.2
		Avg. change			-18.58	

*Change from corresponding value of HMA binder

Table 5. Binder Property Changes by Adding WMA Additives

Classification	Designation	High Failure Temp. (°C)				Low Critical Temp. (°C)	PG	
		Orig.	RTFO	Critical	Change			
HMA	Normal	AP0	67.7	66.4	66.4	-	-14	64-22
	PMA	LV0	79.7	77.7	77.7	-	-14	76-22
		SB0	80.5	78.2	78.2	-	-14	76-22
WMA	Normal	APE	65.8	65.6	65.6	-0.8	-13	64-22
		APW	67.1	66.8	66.8	0.4	-14	64-22
	PMA	LVE	79.7	79.0	79.0	1.3	-14	76-22
		LVW	78.2	77.3	77.3	-0.4	-14	76-22
		SBE	76.8	77.2	76.8	-1.4	-13	76-22
		SBW	80.3	77.9	77.9	-0.3	-13	76-22
		Avg. change					-0.2	

*Change from corresponding value of HMA binder

4.2. 혼합물의 배합설계

본 연구에서는 화강암 굵은 골재 최대 치수 13mm와 9종의 바인더를 조합하여 총 9종의 배합설계를 수행하였다. HMA 최적 아스팔트 함량(Optimum asphalt content: OAC)은 국토해양부(2009) 지침을 적용하여 각 혼합물 별로 공극률 3~5%, VFA 70~85%, VMA 14% 이상, S_b 는 비개질 HMA 3.2MPa, 개질 HMA 4.25MPa 이상의 조건을 만족하는 구간에서 공극률 4%를 기준으로 결정하였다(김부일 등 2006, 라일호 등 2009). 그리고 WMA 혼합물은 HMA의 OAC를 기준으로 공극률 $4 \pm 0.5\%$ 가 얻어지도록 조정을 통해 OAC를

결정하였다. HMA와 WMA 모두 OAC는 5.6~5.9% 사이의 값이 얻어졌고, Table 6은 혼합물의 구분과 OAC에서 제조한 혼합물의 기본 특성이다.

Table 6. Results of Mix Design

Classification	Designation	OAC (%)	Air void (%)	VMA (%)	VFA (%)	S_b (MPa)	
HMA	Normal	AP0	5.7	3.51	16.93	80.15	3.74
	PMA	LV0	5.6	3.65	17.06	79.46	4.37
		SB0	5.7	4.01	17.51	77.13	4.64
WMA	Normal	APE	5.8	3.69	17.85	79.05	3.65
		APW	5.9	4.11	18.17	76.95	3.59
	PMA	LVE	5.9	3.84	17.86	78.61	3.83
		LVW	5.8	3.70	17.77	79.18	3.79
		SBE	5.7	3.93	17.47	77.51	4.10
		SBW	5.6	3.61	16.99	78.73	4.09

4.3. 휨 강도

Table 7은 HMA와 WMA의 온도별 휨강도(S_f) 값을 보여주고, Fig. 7은 휨강도를 재료별 온도별 평균을 그림으로 보여준다. 가장 높은 시험 온도인 -5°C 에서의 휨강도가 7MPa 이상이며 -15°C 에서 높은 것은 10MPa 이상으로 매우 높은 편이다. 이는 포장용 시멘트 콘크리트의 휨강도 기준이 4.5MPa(45kgf/cm²)인 점과 비교하면 저온에서 아스팔트 콘크리트의 휨강도가 매우 높다는 것을 알 수 있다.

Table 7. Flexural Strength at 3 Temperatures

Mix type	Binder	Temp. (°C)	W (mm)	B (mm)	P_{max} (N)	S_f (MPa)
HMA	AP0	-5	68.0	55.5	4,394	7.19
			67.9	57.7	4,733	7.47
		-15	69.1	60.9	5,912	8.54
			68.0	62.1	5,076	7.42
		-25	69.8	59.8	4,883	7.04
			70.2	60.5	5,067	7.14
	LV0	-5	68.6	54.8	5,101	8.31
			68.0	58.0	4,218	6.61
		-15	68.2	59.5	5,174	7.85
			68.4	59.1	6,560	7.99
		-25	68.0	60.0	4,861	7.36
			68.3	60.5	5,545	8.25
SB0	-5	67.9	55.7	6,374	10.43	
		67.5	61.5	5,602	8.40	
	-15	68.5	58.2	6,212	9.55	
		68.7	58.0	6,450	9.90	
	-25	69.0	60.4	5,698	8.32	
		68.0	60.5	6,011	9.02	

WMA	Type	Temp (°C)	S _r (MPa)			
			1	2	3	4
WMA	APE	-5	68.0	56.1	4,850	7.85
			68.0	53.0	4,651	7.97
		-15	68.2	58.2	5,411	8.39
			68.0	60.1	6,754	10.21
			67.6	59.0	5,208	8.11
			68.0	58.8	5,404	8.35
	APW	-5	68.0	61.0	5,487	8.17
			68.0	53.0	4,642	7.96
		-15	67.0	60.0	5,937	9.26
			67.6	55.7	5,692	9.39
			67.2	56.0	4,679	7.77
			67.5	55.2	5,551	9.27
LVE	-5	67.9	56.5	4,259	6.87	
		67.5	54.9	4,936	8.29	
	-15	67.5	57.8	6,267	9.99	
		67.8	62.7	5,961	8.69	
		66.6	59.5	4,676	7.44	
		67.0	61.4	5,915	9.01	
LVW	-5	67.2	56.1	5,068	8.40	
		67.3	57.5	5,061	8.16	
	-15	67.2	60.0	6,149	9.53	
		67.0	61.2	6,535	9.99	
		67.0	61.0	6,035	9.26	
		67.0	61.9	5,924	8.95	
SBE	-5	67.5	57.0	5,294	8.56	
		67.7	53.0	4,563	7.89	
	-15	67.0	53.2	5,768	10.14	
		67.0	59.2	6,246	9.87	
		67.8	57.8	5,242	8.29	
		68.0	59.9	5,435	8.24	
SBW	-5	67.8	59.5	6,273	9.63	
		67.2	57.2	5,827	9.47	
	-15	67.0	58.3	6,573	10.55	
		67.5	60.5	5,925	9.03	
		67.5	60.0	6,145	9.44	
		66.5	57.2	5,692	9.45	

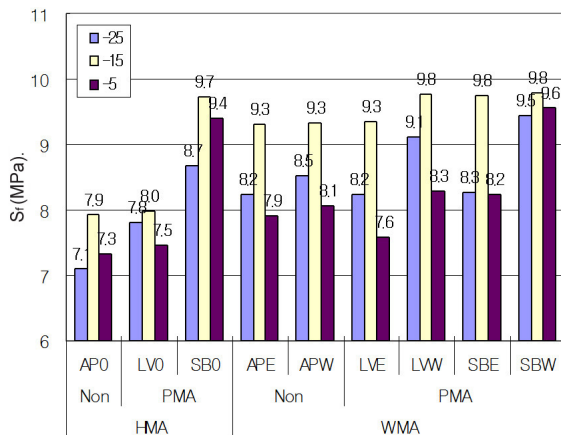


Fig. 7 S_r Comparison by Temperature

Figs. 8~10의 휨강도 비(-5°C를 기준으로 한 S_rratio)에서 보듯이 대부분 혼합물이 -5°C부터 -15°C까지는 증가하다가 -25°C에서는 낮아지는 경향을 보여 -25°C에서는 시차열 수축(DTC)의 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, -25°C에서 휨강도가 -15°C 수준 또는 그 이상을 유지하지 못하고 -15°C를 정점으로 대부분 저하하였고 -25°C에서의 강도가 -5°C 수준보다도 낮아 DTC 손상이 매우 심각한 것도 있었다. 이는 기존의 연구에서와 유사한 경향을 보인 것이다(김광우 등 1995, Kim and Hussein 1995, Kim et al. 1998, Hussein et al 1998, Kim et al. 2003).

재료별로 보면, HMA 일반 (APO)은 -5°C에서 -15°C로 온도가 낮아지면서 휨강도가 약간 높아졌다가 10°C 더 내려가면 -5°C때보다도 더 낮아졌다. 반면 WMA 일반(APE, APW) 역시 -15°C로 까지는 휨강도가 커졌다가 10°C 더 내려가면서 강도가 저하되기는 하나 -5°C때보다는 높은 수준을 유지하였다. HMA LVO PMA는 -15°C로 낮아지며 휨강도가 약간 증가하다 -25°C에서도 거의 저하되지 않았고 WMA는 둘 다 증가-감소 현상을 보였으나 -25°C에서 -5°C보다는 약 10% 높은 강도를 보였다. HMA SBO PMA는 온도저하에 따라 약간 증가하다가 -25°C에서는 -5°C보다 강하되는 현상을 보였으나 WMA SBS는 -25°C에서도 -5°C와 유사한 강도를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 Normal이나 PMA에서 모두 WMA가 HMA보다 DTC 영향을 덜 받음을 보여주는 것이다.

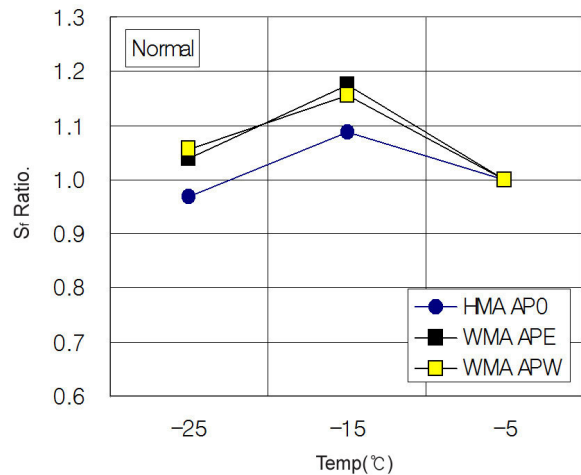


Fig. 8 S_r Change by Temperature Normal Mixes

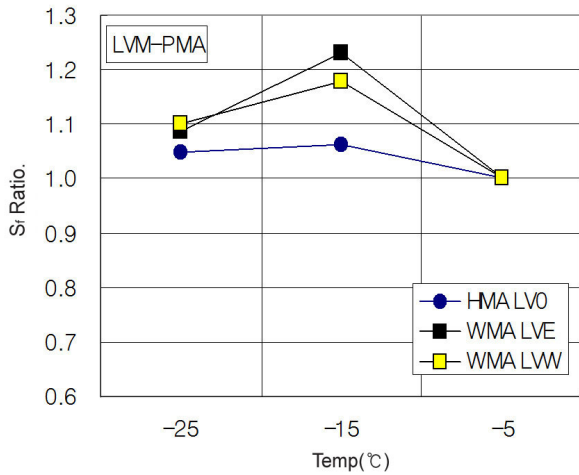


Fig. 9 S_f Change by Temperature LVM PMA Mixes

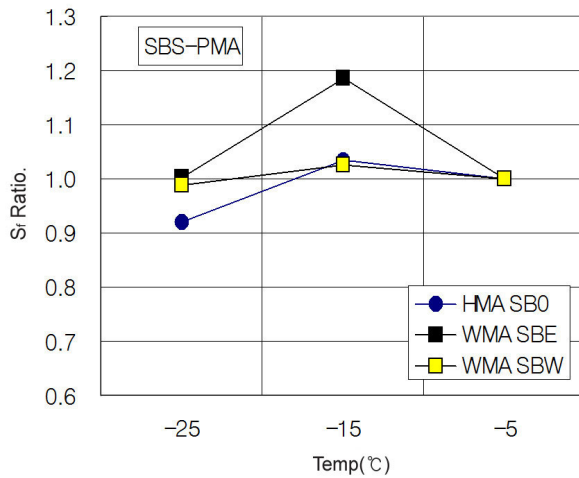


Fig. 10 S_f Change by Temperature SBS PMA Mixes

이는 Table 8의 HMA와 WMA의 온도별 평균에 대한 t-test 결과에서 분명히 보여준다. 이 표에서 $P_r > |t|$ 값이 0.05보다 낮으면 두 평균 간에 통계적으로 5% 유의수준(Significance level: $\alpha=0.05$)에서 유의차(Significant difference)가 있음을 의미한다.

Table 9에서와 같이 HMA와 WMA 두 평균 간의 t-test인(HMA vs. WMA)를 보면 WMA의 휨강도가 HMA보다 -15°C 와 -25°C 에서 통계적으로 높은 것으로 나타나, 온도가 낮아지면 WMA가 저온에 더 강한 것을 알 수 있었다. 또한 HMA와 WMA 모두 -15°C 에서의 최고 강도에 비해 -25°C 에서 강도가 낮아져 통계적으로 유의차가 나타났다(-15°C vs. -25°C t-test). 이는 비록 강도 수준의 차이는 있지만 두 형태의 혼합물이 모두 DTC로 인하여 심각한 강도 저하가 발생함을 통계적으로 보여주는 것이다.

Table 8. Student's t-Test Results for Various Means

Temp	Binder	S_f (MPa)		
		HMA	WMA	
		0	E	W
-5°C	AP	7.19	7.85	8.17
		7.47	7.97	7.96
	LV	8.31	6.87	8.4
		6.61	8.29	8.16
	SB	10.43	8.56	9.63
		8.40	7.89	9.47
avg.	8.07	7.91	8.63	
-15°C	AP	8.54	8.39	9.26
		7.42	10.21	9.39
	LV	7.85	9.99	9.53
		7.99	8.69	9.99
	SB	9.55	10.14	10.55
		9.9	9.87	9.03
avg.	8.54	9.55	9.63	
-25°C	AP	7.04	8.11	7.77
		7.14	8.35	9.27
	LV	7.36	7.44	9.26
		8.25	9.01	8.95
	SB	8.32	8.29	9.44
		9.02	8.24	9.45
avg.	7.86	8.24	9.02	

*Significantly different at $\alpha=0.05$

Table 9. Student's t-Test Results for Various Means

Temp	Binder	$P_r > t $ by t-test					
		HMA vs. WMA	E vs. W	-15°C vs. -25°C		-5°C vs. -25°C	
				HMA	WMA	HMA	WMA
-5°C	AP	0.399	0.034*				
	LV						
	SB						
	avg.						
-15°C	AP	0.047*	0.423			0.351	0.017*
	LV						
	SB						
	avg.						
-25°C	AP	0.038*	0.005*	0.024*	0.005*		
	LV						
	SB						
	avg.						

한편 Figs. 8~10에서와 같이, 미국산 E 첨가제는 W보다 온도변화에 따른 강도증진과 하강의 변동 폭이 더 큰 것으로 나타났다. 반면 W 첨가제는 변동 폭이 적을 뿐만 아니라 Table 7의 세 가지 온도에서 모두 E보다 휨강도가 높았으며 Table 9에서처럼 -5℃, -15℃에서 통계적으로 유의차를 보여 저온에 유리한 첨가제임을 알 수 있었다(E vs. W t-test).

한편 DTC에 의한 손상으로 -25℃에서의 휨강도가 -5℃ 수준을 유지하는지를 보기 위해 -5℃와 -25℃간의 휨강도 평균(-5℃ vs. -25℃)에 대한 t-test를 수행하였다. WMA의 경우 -25℃에서 8.63 MPa로 -5℃의 8.27 MPa보다 통계적으로 유의성이 있게 높음을 알 수 있었다. 반면 HMA 휨강도 평균은 비록 통계적 유의차는 없지만 -25℃의 평균이 7.86MPa로 -5℃의 8.07MPa보다 다소 낮아 이 비교에서도 WMA가 -25℃에서 약간 더 강함을 알 수 있었다. 그 이유를 정확히 알 수는 없지만 이는 상대적으로 골재 온도가 낮아 코팅된 바인더가 덜 산화되기 때문인 것으로 추정된다. 한편 본 연구에 사용된 바인더의 PG 저온등급이 -22이나 -28 등 더 낮은 등급의 바인더가 사용되면 어떤 결과를 가져올지도 연구해 볼 가치가 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 30~40℃ 더 낮은 온도에서 골재를 가열하여 제조한 WMA 콘크리트의 저온 시차열수축(Differential thermal contraction: DTC) 영향이 HMA와 비교하여 어느 정도 나타나는지를 휨강도를 통해 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 아스팔트 콘크리트의 휨강도는 -5℃에서 7MPa 이상, -15℃에서는 10MPa까지 매우 높게 나타났다. 이는 포장용 시멘트 콘크리트의 휨강도 기준이 4.5MPa(45kgf/cm²)인 점과 비교하면 아스팔트 콘크리트가 저온에서 휨강도가 매우 높다는 것을 알 수 있었다.
2. HMA는 물론 WMA 콘크리트도 온도가 -5℃에서 -15℃로 낮아지면 휨강도가 증가하다가 -25℃로 더 낮아지면 휨강도가 다시 낮아지는 DTC에 의한 손상이 나타났다. 즉 -25℃에서 휨강도가 -15℃ 수준 또는 그 이상을 유지하지 못하고 -15℃를 정점으로 대부분 저하하였고 -25℃에서의 강도가 -5℃ 수준 이하로 DTC 손상이 매우 심각한 것도 있었다.
3. 하지만 재료별로 다소 차이는 있으나 HMA보다는 WMA가 -25℃에서 더 높은 휨 강도를 유지하는 것으로 나타났다. 그리고 이 현상은 Normal 아스팔트나 PMA에서 모두 나타나 WMA가 DTC 손상을 덜 받는 것으로 나타났다.
4. T-test를 이용한 통계적 검증에서도 -15℃와 -25℃의 WMA 휨강도 평균이 HMA보다 통계적으로 유의성이 있게 높은 것으로 나타나 저온에서 WMA가 더 우수한 휨강도를 보이는 재료라는 결론을 얻을 수 있었다. 이와 같이 HMA보다 30~40℃ 낮은 온도에서 제조된 WMA가 HMA보다 DTC 손상에 덜 취약하다는 사실은 새로운 발견이다.
5. 그 이유를 정확히 알 수는 없지만 상대적으로 낮은 골재 온도 때문에 DTC의 주원인인 코팅된 바인더가 덜 산화되기 때문인 것으로 추정되나, 보다 확실한 규명을 위해 심도 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 사용된 바인더 저온 등급은 모두 -22℃이나 만일 더 낮은 -28 등급 등을 사용하고 보다 다양한 온도에서의 재료별 DTC 손상 임계 온도를 연구한다면 WMA 저온특성에 대한 좋은 자료가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합건설신소재연구소의 시설과 장비를 이용하여 이루어졌습니다.

References

- Anderson, K. O. and Hahn, W. P. (1968) "Design and evaluation of asphalt concrete with respect to thermal cracking," *Proceedings, AAPT*, 37, Minneapolis, Minnesota.
- CGRA Ad Hoc Committee (1971), "Low-temperature pavement cracking in Canada: The problem and its treatment," *Annu. Meeting, Canadian Good Road Association*, Montreal, Quebec.
- El Hussein, M. H. and El Halim, A. O. (1993), "Differential thermal expansion/contraction: A mechanistic approach to adhesion in asphalt concrete," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3), 366-373.
- El Hussein, M., Kim, K. W. and Phonia, J. (1998) "Assessment of localized damage associated with exposure to extreme low temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(4), ASCE, Nov., 269-274.
- Fabb, T. R. J. (1974) "The influence of mix composition, binder properties and cooling rate on asphalt cracking at low temperatures," *Proceedings, AAPT*, Minneapolis, Minnesota.
- Hass, R. C. G. (1973) "A method for designing asphalt pavements

- to minimize low-temperature shrinkage cracking,” *Research Report No.73-1*, The Asphalt Institute, College park, Maryland.
- Hwang, S. D. (2011) “Low carbon worm-mix asphalt pavement technology,” *Construction Technology News*.
- (황성도 (2011) “저탄소 중온 아스팔트 포장 기술,” 건설기술신문.)
- Kandhal, P. S. (1980) “Evaluation of low-temperature pavement cracking on Elk county research project,” *Transportation Research Record 777*, TRB, Washington, D. C.
- Kim, B. I., Lee, M. S. and Kim, K. W. (2006), “Methodology for developing HMA mix design taking into account performance-related mechanics properties,” *Journal of Korean Society of Road Engineers*, 8(1), 15-23.
- (김부일, 이문섭, 김광우, “포장성능관련 역학적 특성이 고려된 아스팔트 혼합물의 배합설계 방안,” 한국도로학회 논문집, 8(1), Mar. 2006, 15-23.)
- Kim, N. H. (1995) “Effect of Moisture on Low temperature asphalt mixture properties and thermal cracking performance of pavements” Ph.D. thesis. Pennsylvania state university.
- Kim, K. W. (1995), “Assesment of asphalt concrete damage due to low temperatures,” *Quarterly Construction Materials*, First Ed., 156-163
- (김광우 (1995), “아스팔트 콘크리트의 저온손상 규명,” 계간 전자재, 한국전자재시험연구원, 창간호, 156-163)
- Kim, K. W. and El Hussein, H. M. (1995) “Effect of differential thermal contraction on fracture toughness of asphalt materials at low temperatures,” *Journal of AAPT*, 64, 474-496.
- Kim, K. W. and M. El Hussein, (1997) “Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures,” *Construction and Building Materials*, Nos 7-8, pp. 403-411.
- Kim, K. W., Kweon, S. J., Doh, Y. S. and Park, T. S., “Fracture Toughness of Polymer- modified Asphalt Concrete at Low Temperatures,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(2), April 2003, 406-413.
- Kim, K. W., Yeon, K. S. and El Hussein, M. (1995), “Mechanical characteristic of asphalt concrete at low temperatures,” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 15(6), 1557-1564
- (김광우, 연구석, El Hussein (1995) “저온하에서 아스팔트 콘크리트의 역학적 특성,” 대한토목학회논문집, 15(6).)
- Kwon, S. Z. (1999), “Fracture behavior of polymer- modified bituminous concrete at low temperatures,” Ph.D. Dissertation, Graduate School, Kangwon National University, Chuncheon, Korea.
- (권승준 (1999) “폴리머 개질 역청 콘크리트의 저온 파괴 특성,” 박사학위논문, 강원대학교 대학원.)
- La, I. H., Kim, J. C., Doh, Y. S. and Kim, K. W. (2009), “Statistical inference for process mean of deformation strength of asphalt mixtures,” *Journal of Korean Society of Road Engineers*, 11(1).
- (라일호, 김진철, 도영수, 김광우 (2009), “통계적 근거에 의한 표층 아스팔트 혼합물 변형강도의 배합강도 설정연구,” 한국도로학회 논문집, 11(1), 127-134.)
- Lee, M. S., Yun, C. J., Kweon, S. A. and Kim, K. W. (2011), “Feasibility evaluation of number of gyration for HMA and WMA mixtures,” *Journal of Korea Society of Road Engineers*, 13(4), 133-142.
- (이문섭, 윤천주, 권수안, 김광우 (2011), “HMA와 WMA 혼합물의 선회다짐횟수 적정성 검토연구,” 한국도로학회논문집, 13(4), 133-142)
- 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*, No. 2208, 40-47.
- “Production and Construction Guide for Asphalt Mixtures,” (2009), Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea 2009
- (국토해양부 (2009) “아스팔트 혼합물의 생산 및 시공지침”)
- (접수일 : 2012. 5. 7 / 심사일 : 2012. 5. 9 / 심사완료일 : 2012. 7. 3)