

SDAR을 이용한 아스팔트 혼합물의 적용성 평가

Application Evaluation of Asphalt mixtures using SDAR (Solvent DeAsphaltene Residue)

양 성 린	Yang, Sung Lin	정회원 · 한국건설기술연구원 전임연구원 · 공학석사 (E-mail : siyang@kict.re.kr)
임 정 혁	Im, Jeong Hyuk	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 공학박사 (E-mail : jhim@kict.re.kr)
황 성 도	Hwang, Sung Do	정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 · 공학박사 (E-mail : sdhwang@kict.re.kr)
백 철 민	Baek, Cheolmin	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : cmbaek@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The objective of this study is to evaluate the SDAR (solvent deasphaltene residue), which is obtained from the solvent deasphalting (SDA) process, as a pavement material.

METHODS : The physical properties of the SDAR were evaluated based on its chemical composition, and asphalt mixtures with the SDAR were fabricated and used for the evaluation of mechanical properties. Firstly, the chemical composition of SARA (saturate, aromatic, resin and asphaltene) was analyzed using the TLC-FID (thin-layer chromatography-flame ionization detector). Moreover, the basic material properties of the asphalt binder with the SDAR were evaluated by the penetration test, softening point test, ductility test, and PG (performance grade) grade test. The rheological properties of the asphalt binder with the SDAR were evaluated by the dynamic shear modulus (G^*) obtained using the time-temperature superposition (TTS) principle. Secondly, the mechanical properties of the asphalt mixtures with the SDAR were evaluated. The compactibility was evaluated using the gyratory compacter. Moreover, the tensile strength ratio (TSR) was used for evaluating the moisture susceptibility of the asphalt mixtures (i.e., susceptibility to pothole damage). The dynamic modulus E^* , which is a fundamental property of the asphalt mixture, obtained at different temperatures and loading cycles, was used to evaluate the mechanical properties of the asphalt mixtures.

RESULTS AND CONCLUSION : The SDAR shows stiffer and more brittle behavior than the conventional asphalt binder. As the application of the SDAR directly in the field may cause early failures, such as cracks on pavements, it should be applied with modifiers that can favorably modify the brittleness property of the SDAR. Therefore, if appropriate additives are applied on the SDAR, it can be used as a pavement material because of its low cost and strong resistance to rutting.

Keywords

SDAR (solvent deasphaltene residue), SARA (saturate, aromatic, resin, and asphaltene) analysis, moisture damage, traffic densification index, dynamic modulus

Corresponding Author : Baek, Cheolmin, Senior Researcher
Highway and Transportation Research Institute, Korea Institute of Civil
Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu,
Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.995.0894 Fax : +82.31.910.0161
E-mail : cmbaek@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received May, 19, 2015 Revised Jul, 17, 2015 Accepted Jul, 21, 2015

1. 서론

현재까지 일반적으로 사용되고 있는 석유제품은 경질 원유에 의해 제조되고 있으나, 이러한 원유 매장량은 1

조 배럴 정도로서 2010년 근방에서 원유 생산 정점에 도달한 후에 점차적으로 생산량이 감소할 것으로 예측되고 있다(Nu, N., 2007). 전세계의 원유소비량은

2015년까지 매년 평균 1.7% 정도의 증가율을 보이면서 2020년 경에는 1억 배럴/일에 도달할 것으로 예상되며, 지역별로 구분하면 아시아 지역의 소비 증가율이 다른 지역을 크게 앞지르면서 2015년 즈음에는 전세계 원유 소비량의 30% 정도를 아시아 지역에서 소비할 것으로 전망하고 있다(Yang S, 2014).

전세계적인 원유의 중질화 추세에 대비하여 선진국에서는 저가 중질유분을 저비용/고효율의 환경친화적인 방식으로 경질화하여 다양한 용도로 효과적으로 활용하기 위한 새로운 경질화 기술 개발을 진행 중에 있다. 원유를 전량 수입하는 한국의 입장에서는 위에서 언급한 원유 관련 전망을 반영하여 장기적인 원유 수급 전략을 수립하고 유가 상승과 경질원유의 고갈에 대비하기 위하여 천연 역청이나 초중질유와 같은 중질유분을 확보하고 활용하는 방안을 적극적으로 검토해야 할 것으로 판단된다. 저가 중질유분의 매장량 분포는 Fig. 1에서와 같이 주로 북미, 남미, 러시아, 중국 등에 집중적으로 매장되어 있는 것을 확인할 수 있다(K. Kimber, 2007).

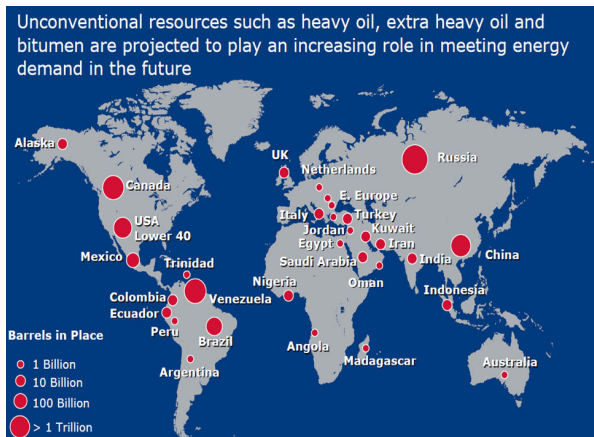


Fig. 1 Distribution of Heavy Oil Fractions Reserve

이에 국내에서도 전세계적으로 에너지 다변화 및 해외자원 확보 노력에 부응하는 방안으로 일반 원유에 비하여 매장량이 훨씬 풍부한 초중질유 광구를 확보하고 이로부터 양질의 합성원유와 고부가의 화학원료 및 재료를 생산하기 위한 새로운 개념의 차세대 경질화 공정에 대한 국내 기술의 개발을 활발히 진행중에 있다. 그러나 새로운 중질유분에 대한 경질화 공정이 고도화될수록 정제공정에서 배출되는 경질화 부산물인 아스팔트(Bitumen), 아스팔텐(Asphaltene), 피치(Pitch) 등은 국내 95%를 차지하고 있는 아스팔트 포장의 원료로서 활용하는데는 한계가 있다. 즉, 경질화 공정이 고도화됨으로써 고부가가치의 DAO(DeAsphaltene Oil)의 추

출은 증가되고 유분기가 전혀 없는 아스팔트가 생산되기 때문에 현재 사용되고 있는 아스팔트와는 전혀 다른 아스팔트가 생산되어 포장 재료로서 활용하는데 한계가 있다(Yang S, 2014).

따라서 본 연구에서는 저가 중질유분을 저비용/고효율의 부분경질화방식인 SDA 공정을 통해 발생된 residue(이하 SDAR)를 이용하여 도로포장 재료 즉, 역청 재료로서의 활용 가능성을 평가하고자 하며 상기와 같은 residue의 화학적 분석을 통하여 기존 아스팔트 바인더와의 구성성분 분석 및 물리적 특성의 비교·평가를 수행하고자 한다. 또한 SDAR을 이용한 혼합물 제작 및 역학적 특성 평가를 통하여 실내 공용성 및 역학적 거동 특성을 평가하여 포장 재료로서의 가능성을 평가하고자 한다.

2. SDAR의 구성성분 분석 및 물리적 특성

본 연구에서는 캐나다 블랙골드 광구, 베네수엘라 등에 매장되어 있는 저가 중질유를 활용할 수 없는 것을 감안하여 현재 국내 정유회사 중 SDA 공정을 통하여 원유 정제를 수행하고 있는 정유사에서 발생된 SDAR을 이용하여 본 연구를 진행하였다.

먼저 기존에 도로포장재료로서 사용되고 있는 아스팔트 바인더(이하, Control, PG 64-22)와의 차이점을 파악하기 위해 TLC-FID(Thin Layer Chromatography-Flame Ionization Detector)를 이용한 SARA(Saturates Aromatics Resin Asphaltene) 분석을 수행하였으며 아스팔트 바인더의 기본물성시험인 침입도, 연화점, 신도, PG등급 시험을 수행하였다. 또한 온도 및 하중주기에 따른 동전단탄성계수(G^*)의 변화를 알아보기 위해 Time-Temperature Superposition(이하, TTS) 시험을 수행하였다.

2.1. SARA 분석

국내 정유사 중에서 고품위화 정유 공정인 SDA 공정을 이용하는 S사에서 추출된 SDAR에 대한 주요 구성성분비를 파악하기 위해 TLC-FID를 이용하여 SARA 분석을 수행하였다. TLC-FID 분석은 먼저 DCM에 1%(w/v)로 녹인 시료 1uL를 TLC rod에 전개시켜 IATROSCAN MK-6 (Iatron Lab. Inc.)의 FID 검출기로 분석하였으며, FID의 측정조건은 Air 2.0L/min, Hydrogen 160mL/min, scan speed 30sec/scan으로 하였다. 일반적으로 잘 알려져 있는 SARA 성분분리 전

개순서(1st: Hexane - 2nd: Toluene - 3rd: DCM/MeOH(95:5)) 와 역순으로 전개 (1st: DCM/MeOH(95:5) - 2nd: Toluene - 3rd: Hexane) 하였을 때의 SARA 성분분리 양상을 비교하였으며 Resin과 Asphaltene 성분이 더 잘 분리됨을 확인하였다(K. H. Kim et al, 2008).

Fig. 2는 현재 일반적으로 사용되고 있는 PG 64-22 인 아스팔트 바인더와 S사에서 추출된 SDAR의 SARA 분석 결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 PG 64-22인 아스팔트 바인더와 SDAR의 주요 성분 비율은 거의 유사한 것으로 파악되었으며 다만, SDAR의 Saturates 가 기존 아스팔트 바인더에 비해 약 1% 정도 낮은 것으로 파악되었다.

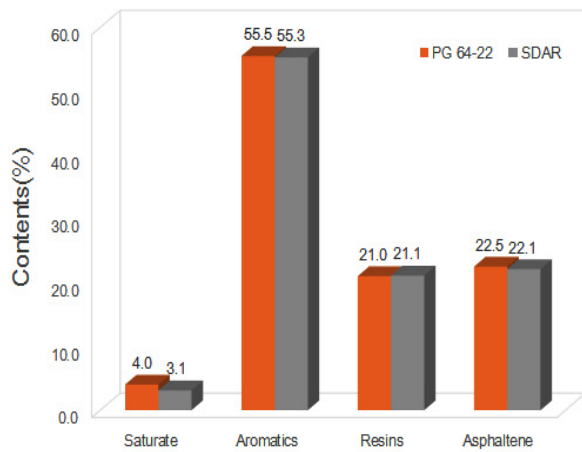


Fig. 2 SARA Analysis Result using TLC-FID

2.2. SDAR의 기본 물리적 특성

SDA 공정을 통해 추출된 residue에 대한 물리적 특성을 평가하기 위해 침입도, 연화점, 인화점, 신도, 회전점도 실험을 수행하였으며 PG 등급을 결정하기 위해 단기 노화, 장기노화, DSR(Dynamic Shear Rheometer), BBR(Bending Beam Rheometer) 시험을 수행하였다. 또한 SDAR의 온도 및 하중주기에 따른 동전단 탄성계수를 측정하여 기존 아스팔트 바인더와 비교·평가를 수행하였다.

2.2.1. 기초 물성 실험

실내 기초 물성 실험 결과, 결론적으로 SDA 공정을 거쳐 생산된 residue는 기존 아스팔트(PG 64-22)에 비해 단단하며 연질특성이 현저히 감소되는 경향을 나타내었다.

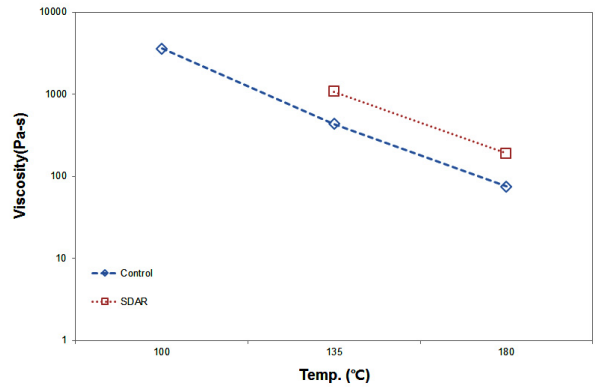


Fig. 3 Viscosity Result using Rotational Viscometer

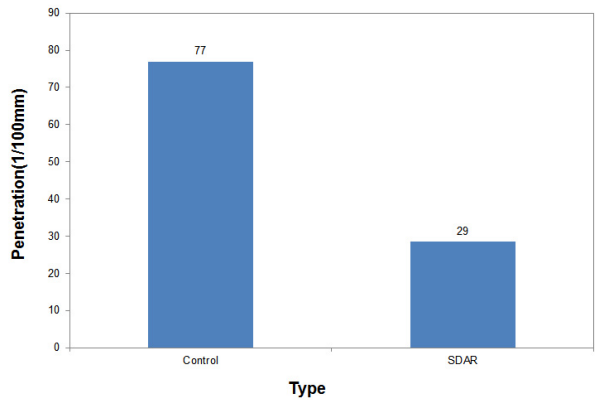


Fig. 4 Penetration Result of SDAR

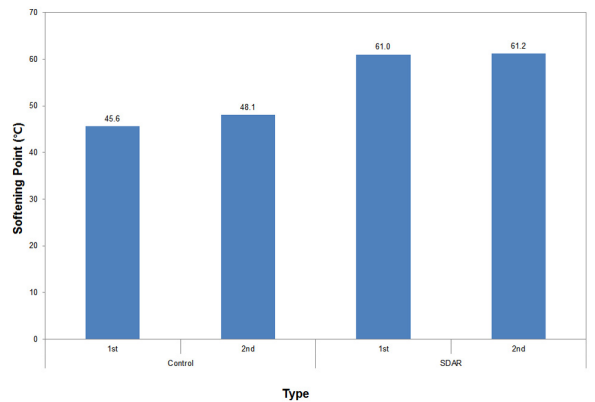


Fig. 5 Softening Point of SDAR

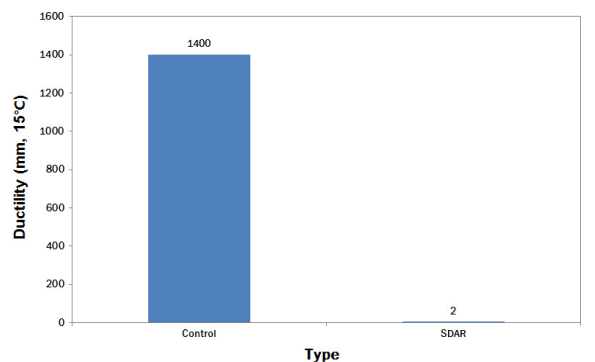


Fig. 6 Ductility Result of SDAR

SDAR은 침입도 시험을 통한 아스팔트 등급을 구분할 수 없을 정도로 단단한 특성을 가지는 것으로 파악되었으 며 100℃에서는 회전점도 실험이 불가능할 정도로 고점도인 것으로 나타났으며 고온이 아닌 온도에서 가공하기 어려운 것으로 나타났다. 또한, 신도결과 역시 시험 시작과 동시에 파단이 발생하는 것으로 나타났으며 인화점 시험에서는 240℃ 이상으로 안전성 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

상기 결과를 토대로 SDA 공정을 거친 residue는 취성적인 특성이 강하고 점도가 높아 가공하기 어려운 단점을 가지는 것으로 판단된다.

2.2.2. SDAR의 공용성 등급

SDAR의 공용성 등급을 평가하기 위해 단기노화 전·후의 $G^*/\sin\delta$ 를 측정하였으며 장기노화를 통한 저온에서의 stiffness 및 m-value 값을 측정하였다. 실험 결과, SDAR은 기존 아스팔트의 고온 등급인 64℃에 비해 2등급이 높은 76℃를 나타냈으며 장기노화 후 저온 특성은 0℃ 실험 도중 파손되어 저온 등급 측정이 불가능한 것으로 파악되었다. 단기노화(RTFO) 후 $G^*/\sin\delta$ 값의 변화는 SDAR보다 기존 아스팔트의 변화 폭이 큰 것으로 나타났다. 이는 SDAR은 정제 공정을 거치면서 saturates의 산화 및 감소로 인하여 노화(aging)가 많이 발생되고 이로 인하여 노화에 따른

물성변화가 크지 않은 것으로 판단된다. 상기와 같은 결과와 화학적 특성을 고려하여 본다면 saturate 함량에 따라 물리적 특성이 크게 변화되는 것으로 판단되며 SDAR은 소성변형에 대한 저항성은 높은 반면 온도 및 피로 균열에는 취약한 단점을 가지는 것으로 판단된다.

2.2.3. 온도 및 하중주기에 따른 동전단 탄성계수 변화 특성

본 시험은 SDAR에 대한 역학적 특성 평가로서 시간-온도 중첩이론을 이용한 mastercurve 작성을 위해 다양한 하중빈도와 온도에서 아스팔트 동전단 탄성계수 변화를 측정하였다. 시험을 위한 Strain level은 0.1%와 1.0%를 적용하였으며 두 가지 조건에서의 시험 결과가 동일하게 나타나게 된다면 선형 탄성 범위 내에서 적절하게 진행된 것으로 기존 아스팔트와 SDAR에 모두 동일하게 적용하였다. 실험온도는 13~90℃로 7℃ 간격으로 실험을 수행하였으며 하중주기는 6.28, 9.96, 15.78, 25.01, 39.64, 62.833의 6개 속도 적용하였다. 실험의 신뢰성을 확보하기 위해 48℃를 기준으로 48℃ 이하에서는 8mm Plate, Gap 2.0mm, 48℃ 이상에서는 25mm Plate, Gap 1.0mm로 실험 수행하였다. 각각의 온도에서 측정된 동전단 탄성계수를 이동시켜 mastercurve 작성을 하고 이때 만들어지는 이동계수(shift factor)는 2차함수를 fitting하여 결정하였다(Yun T, 2013). Mastercurve와 Shift factor는 Excel solver를 이용하여 최소오차법을 통하여 Sigmoidal 함수의 계수를 결정하였다.

Fig. 7은 SDAR에 대하여 strain level 0.1%와 1.0%를 기준으로 DSR 실험을 통하여 얻어진 동전단 탄성계수에 대한 마스터커브를 나타낸다. 낮은 하중주기는 고온에서의 소성변형 저항성을 나타내며 높은 하중주기는 저온에서의 온도 균열 저항성을 나타냄으로 고온에서는 전단탄성계수가 높을수록 소성변형 저항성이 우수한 것을 나타내며 저온에서는 전단 탄성계수가 낮을수록 유동성을 증가시켜 온도에 따른 균열 저항성이 우수한 것으로 평가된다. SDAR은 기존 아스팔트에 비해 저온 및 고온에서 모두 높은 탄성계수를 가지는 것으로 나타났으며 특히, Pitch는 기존 아스팔트에 비해 저온에서 약 10~100배 이상 높은 탄성계수를 가지는 것으로 나타났다. 이는 저온에서 급격하게 취성적인 특성을 나타내는 것으로 겨울철 발생하는 온도 균열에 대한 저항성이 낮은 것으로 판단된다.

Table 1. Performance Grade on SDAR

Test type	Temp.	Control	SDAR
Rotational viscosity, cP	135℃	435	1075
Original DSR $G^*/\sin\delta$ $\geq 1.0\text{kPa}$	58℃	2.325	30.214
	64℃	1.100	12.113
	70℃	0.552	4.501
	76℃		2.107
	82℃		1.021
RTFO DSR $G^*/\sin\delta$ $\geq 2.2\text{kPa}$	58℃	7.566	35.446
	64℃	3.417	18.218
	70℃	1.630	6.731
	76℃		3.188
	82℃		1.587
BBR	Stiffness (<300MPa)	92 (-12℃)	N/A
	M-value (>0.3)	0.322 (-12℃)	N/A
Performance grade	-	64-22	76

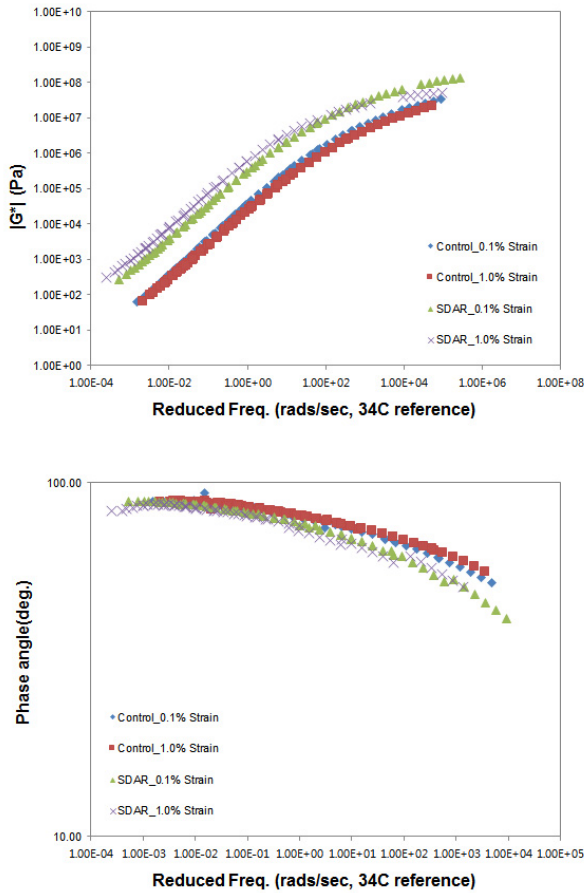


Fig. 7 |G*| Mastercurve and Phase Angle of SDAR

3. SDAR을 적용한 아스팔트 혼합물 특성

SDAR을 이용한 아스팔트 혼합물(이하, SDAR-M)에 대한 실내 실험을 수행하였으며 먼저 현장 적용성을 평가하기 위하여 선회다짐기를 이용한 다짐도 분석을 수행하였다. 또한 최근 사회적으로 가장 큰 문제가 되는 포트홀 발생 여부를 판단하기 위하여 인장강도 비(Tensile Strength Ratio, TSR)를 통한 수분 민감도 평가를 수행하였으며 온도 및 하중주기 변화에 따른 탄성계수 변화 특성을 평가하기 위해 동탄성계수(Dynamic Modulus Test, DMT) 시험을 수행하였다.

3.1. 배합설계

SDAR-M에 대한 배합설계는 국토교통부에서 발간된 「가열 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공 지침(2014)」 지침에 수록된 표층용 아스팔트 혼합물인 WC-3(19mm 밀입도) 기준에 만족하도록 수행하였다. 다짐 장비는 IPC사의 Servopac 선회다짐기를 사용하였으며 중교통량을 기준으로 다짐 횟수 100회를 적용하였

다. 회전 점도를 통한 혼합 및 다짐온도는 기준 아스팔트 혼합물에 비해 약 $15 \pm 3^\circ\text{C}$ 높은 온도인 $170 \pm 3^\circ\text{C}$, $150 \pm 3^\circ\text{C}$ 에서 혼합 및 다짐이 수행되었다. 먼저 기준 가열 아스팔트 혼합물 배합설계 결과에서 선정된 최적 아스팔트 함량(4.7%)을 SDAR 혼합물에 동일하게 적용하였으며 혼합 및 다짐온도만 약 15°C 높여 공용성 평가용 시편을 제작하였다. Fig. 8은 본 연구에서 적용한 WC-3 19mm 밀입도 혼합물에 대한 골재 합성입도를 나타낸다.

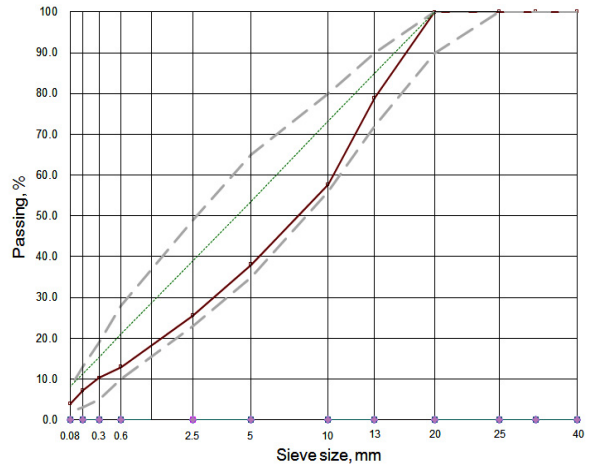


Fig. 8 19mm Dense Gradation for HMA

3.2. 선회다짐기를 이용한 현장 적용성 및 다짐도 평가

Fig. 9는 선회다짐기를 이용하여 다짐도를 평가한 결과를 나타내며 160회 다짐되는 동안 아스팔트 혼합물의 이론최대밀도 대비 실측 밀도를 측정된 결과를 나타낸다. Fig. 8은 다짐도 분석 방법을 나타내며 다짐에너지 지표(CEI, Compaction Energy Index)는 일반적으로 패이버와 로울러가 시공하는 동안 필요한 밀도를 얻기 위해서 아스팔트 혼합물에 가해야 되는 다짐에너지를 의미한다. CEI를 구하기 위해서는 선회다짐횟수와 이론최대밀도(비율, %)의 그래프에서 N_{ini} 과 이론최대밀도가 92%가 되는 그래프 곡선 아래의 면적을 나타낸다. 상기 면적이 낮으면 낮을수록 적은 에너지를 사용해서 다질 수 있는 것을 의미하므로 낮을수록 아스팔트 혼합물의 다짐도가 높은 것을 의미한다. 또한 교통에 의한 포장 고밀도화 지표(TDI, Traffic Densification Index)는 현장에서 다짐이 끝나고 나면(이론최대밀도의 92%) 교통을 개방한 후, 아스팔트 포장은 교통하중에 의해 지속적으로 고밀도화가 진행되는데 일반적으로 교통에 의한 고밀도화 지표를 구하는 방법은 2가지로 1)

이론최대밀도와 실측밀도와의 비율이 92%에서 96%사이의 값을 가지는 그래프 곡선 아래의 면적이나 2) 92%에서 98% 사이의 값을 가지는 그래프 곡선 아래의 면적을 TDI로 정의한다(H.U.Bahia, et al, 1998). 본 연구에서는 다짐에너지를 동일하게 적용하는 것을 가정하여 160회 선화다짐 결과를 이용해서 이론최대밀도와 실측밀도와의 비율을 92%에서 160회 선화다짐까지 곡선 아래의 면적을 적용하여 TDI를 정의하였다. TDI 값은 연구변형이 발생할 수 있는 최대밀도 상태를 반영하기 때문에 TDI 값이 크면 클수록 설계 교통량과 교통하중에 의해 최대밀도 상태에 이르기 위한 에너지 값이 크다는 것을 의미한다.

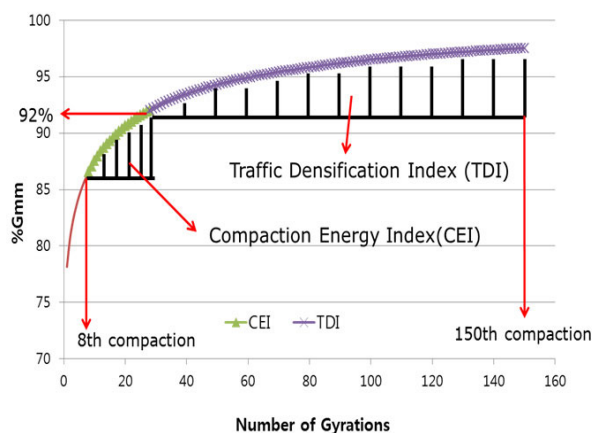


Fig. 9 Analysis Method of Compactivity

Fig. 10은 선화다짐기 160회 다짐을 통한 기존 가열 아스팔트 혼합물과 SDAR 혼합물에 대한 다짐도 실험 결과를 나타내며 Table 2는 각 혼합물에 대한 CEI 및 TDI 결과 값을 나타낸다. 그림에서와 같이 SDAR 혼합물의 혼합 및 다짐온도가 약 15℃ 높음에도 불구하고 160회 다짐 후의 실측밀도가 낮은 것으로 나타나 기존 아스팔트 혼합물에 비해 낮은 다짐도를 나타내었다. 또

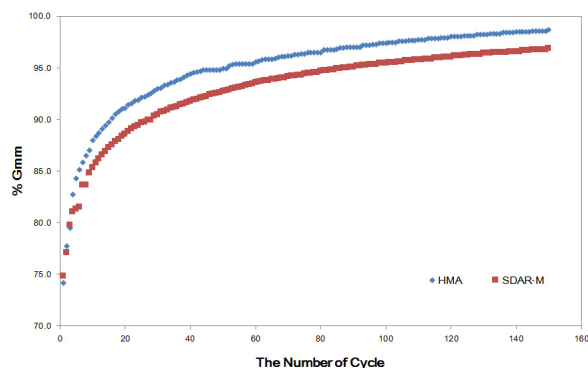


Fig. 10 Evaluation of Compactivity on SDAR-M

Table 2. Traffic Densification Index(TDI) Results regarding SDAR-M and HMA

Contents	HMA (Control)	SDAR-M
Paver energy index	54.7	40.3
Compaction energy index	53.9	188.5
Traffic densification index	568.3	328.9

한 SDAR-M은 HMA보다 약 15℃ 높은 온도에서 다짐이 시작되는 것을 감안하여 볼 때 초기 PEI 값은 낮은 것으로 평가되었으나 CEI 값이 약 3.5배 이상 크게 나타나 목표 다짐도를 확보하기 위해서는 HMA에 비해 약 3.5배 이상 높은 다짐에너지를 적용해야 되는 것으로 나타났다.

3.3. SDAR-M의 수분민감도 평가

SDAR-M을 이용하여 최근 포트홀과 같이 사회적으로 가장 큰 문제가 되는 수분 손상에 대한 저항성을 평가하기 위하여 AASHTO T 283 「Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture-Induced Damage」 절차에 따라 인장강도 비(TSR) 시험을 수행하였다. AASHTO T 283에서 제시한 실험 절차에 따라 HMA와 SDAR-M를 각각의 혼합온도에서 혼합하고 혼합된 혼합물을 가열 오븐에 넣고 60℃에서 24시간 거치한 후에 다시 다짐온도에서 2시간 양생한 후에 공극률 $7.0 \pm 0.5\%$, 높이 95mm, 지름 150mm로 각각 6개의 시편을 제작하여 총 12개의 시편을 제작하였다. 제작된 혼합물은 두 그룹으로 분류하고 첫 번째 그룹은 수분처리를 하지 않고 25℃에서 인장강도 시험을 수행하고 다른 그룹은 수분을 강제로 시편 내부로 침투시켜 수분에 의한 포화도가 70~80% 되도록 수침 부분 포화를 시킨 후에 60℃에서 24시간 수침한 후에 다시 25℃에서 2시간 이상 양생하여 인장강도 시험을 수행하였다. 인장강도 비는 수분처리 전·후의 부착성능 저하로 인한 강도 감소 비율로서 정의되며 이를 통하여 수분에 대한 저항성을 평가하였다. Fig. 11은 각 혼합물에 대한 수분처리 전·후의 강도 변화를 나타내며 그림에서와 같이 SDAR-M은 수분처리 전·후의 강도가 약 40% 정도 감소되는 것으로 나타났으며 HMA에 비해 TSR 결과 값이 약 20% 정도 낮은 결과를 나타냈다. 이는 SDAR-M은 수분에 의해 SDAR과 골재와의 부착 성능이 현저히 감소되는 것으로

로 수분에 노출될 경우 쉽게 골재 피막 박리가 발생되는 것으로 판단된다. 따라서, SDAR을 도로 포장 재료로서 가공없이 그대로 적용할 경우 우기 또는 장마철에 포트홀과 같은 도로 포장 파손을 유발할 수 있을 것으로 판단된다.

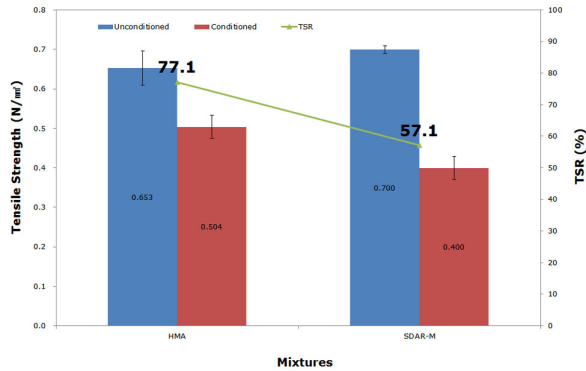


Fig. 11 Tensile Strength Ratio(TSR) Results on SDAR-M and HMA

3.4. SDAR-M의 점탄성 거동 특성 평가

SDAR-M의 온도/하중주기에 따른 탄성계수 변화를 측정하기 위해 MTS 810 장비를 이용하여 동탄성계수 실험을 수행하였다. 실험 조건은 하중주기 20, 10, 5, 1, 0.5, 0.1Hz였으며 온도는 -10, 5, 20, 40, 54℃에서 수행하였다. AASHTO TP 62 기준 절차를 따라 하중레벨은 총 변형률의 50~75μs를 갖도록 하중제어 시험 방식으로 수행하였다. 선형 점탄성 범위에서의 아스팔트 혼합물은 Thermorheologically Simple(TRS)인 것으로 알려져 있으며 이는 시간과 온도의 영향이 결합되어 표현되는 감소시간(reduced time) 또는 감소빈도(reduced frequency)로 표현된다. 감소빈도는 아래 식에 나타난 바와 같이 시간-온도 이동계수(time-temperature shift factor, aT)를 통하여 계산된다.

$$f_R = f \times a_T$$

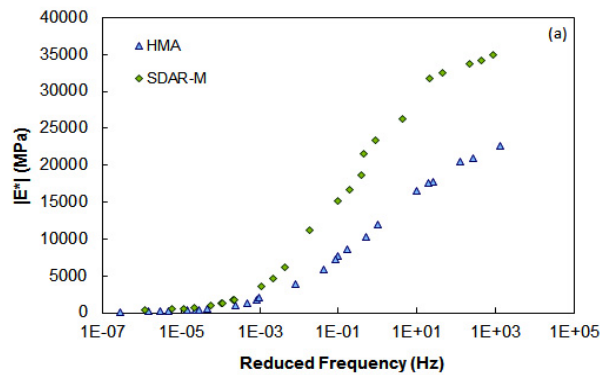
이는 전체적 그래프를 수평적으로 이동하여 하나의 곡선(mastercurve)을 작성할 수 있도록 하여 넓은 감소빈도에서의 아스팔트 혼합물의 거동을 묘사할 수 있도록 하며, 시간-온도 이동계수는 마스터곡선을 작성하기 위하여, 필요한 로그 스케일에서 수평방향 이동을 나타낸다. 이동량은 기준온도(reference temperature)에 의하여 결정되며, 온도에 따라 변화하게 된다. 마스

터곡선은 Sigmoidal 함수형태로 표현되며 이동계수와 온도와의 관계는 2차 함수식으로 표현된다. Sigmoidal 계수와 시간-온도 이동계수를 결정하기 위하여 EXCEL 프로그램에서 제공하는 Solver를 이용하여 최소자 법으로 결정하였다.

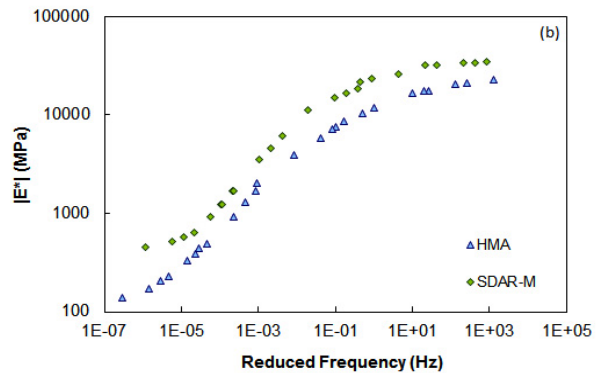
$$\log |E^*| = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{e^{d+g \cdot \log(f_R)}}}$$

$$\log(a_T) = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3$$

Fig. 12는 SDAR-M의 온도 및 하중주기에 따른 동탄성계수 마스터곡선을 나타내며 그림에서와 같이 SDAR-M은 HMA에 비해 저온(높은 하중주기)에서 탄성계수가 약 2배 이상 높은 것으로 나타났으며 이는 저온에서의 균열 저항성이 감소될 것으로 판단된다. 또한 고온(낮은 하중주기)에서의 탄성계수 역시 HMA에 비해 높은 탄성계수를 나타내어 소성변형에 대한 저항성이 향상될 것으로 판단된다. SDAR-M은 모든 온도 및 하중주기 영역에서 HMA에 비해 약 2배 정도



(a) semi-log scale (low-temp.)



(b) log-log scale (high-temp.)

Fig. 12 Dynamic Modulus Master-curve for SDAR-M and HMA

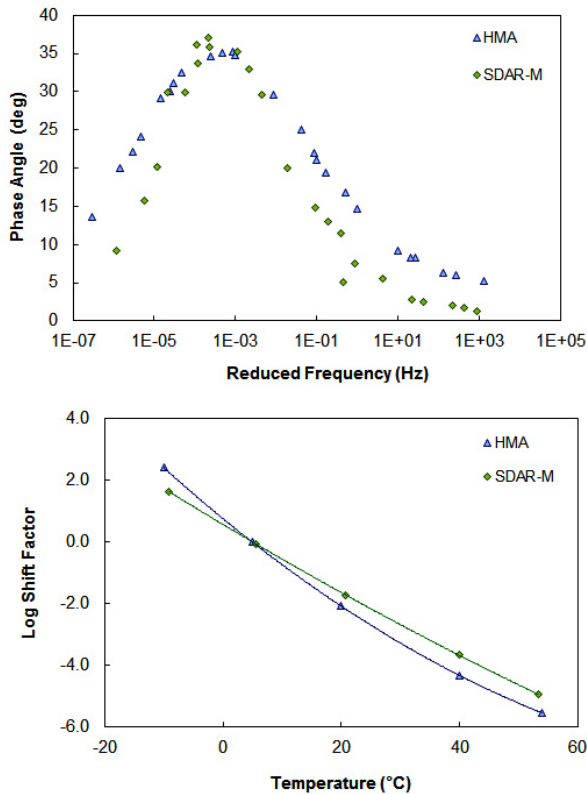


Fig. 13 Phase Angle Master-curve & Shift-factor for SDAR-M and HMA

높은 탄성계수를 가지는 것으로 나타났으며 이는 고온에서 발생하는 변형에 대한 저항성은 향상시키지만 저온 또는 상온에서의 균열 저항성은 감소되는 것으로 아스팔트 바인더 실험 결과와 일맥상통하는 결과를 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 SDA 공정을 통해 발생된 경질화 부산물인 SDAR을 도로 포장 재료로서의 가능성 및 적용성 평가를 수행하였으며 이를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. SDA 공정을 통해 발생된 SDAR은 SDA 공정과정 중 DAO(DeAsphaltene Oil)를 추출하고 남은 것으로 화학적 구성성분 분석결과, SARA 성분 중 Saturate 함량의 변화가 발생하는 것으로 파악되었으며 이에 물리적/역학적 특성 변화가 발생된 것으로 SDAR은 고점도이면서 기존 아스팔트 바인더에 비해 단단하고 취성적인 특성으로 인하여 균열에 대한 저항성은 감소되고 소성변형에 대한 저항성은 증가되

는 것으로 판단된다.

2. SDAR-M은 현장 적용 시 기존 아스팔트 혼합물과 동일한 다짐도를 확보하기 위해서는 기존 아스팔트 혼합물에 비해 높은 다짐에너지가 필요한 것으로 판단된다. 또한 인장강도 비가 57.1%로 기존 아스팔트 혼합물에 비해 약 20% 감소되는 것으로 나타났으며 수분처리 전·후의 강도 변화가 약 40% 이상으로 포장체 내부로 수분이 침투하게 되면 골재와의 부착 성능이 현저히 감소되어 골재 피막 박리가 쉽게 발생하는 것으로 판단되어 포트홀과 같은 포장 파손을 쉽게 발생시킬 것으로 판단된다.
3. SDAR-M은 전반적으로 기존 아스팔트 혼합물에 비해 탄성계수가 2배 정도 높은 것으로 소성변형에 대한 저항성은 향상시키지만 저온 및 상온에서의 균열 저항성은 감소시킬 것으로 판단된다.

본 연구 결과에서는 SDAR은 유분기를 제거한 아스팔트로서 기존 아스팔트 혼합물에 비해 단단하고 취성적인 거동 특성이 강한 재료로서 평가되었다. 이를 현장에 그대로 적용하는 것은 포장의 조기 파손을 발생시키는 주요한 원인이 될 수 있으며 이를 방지하기 위해서는 취약한 부분을 개선할 수 있는 개질 첨가제가 추가적으로 적용되어야 할 것으로 판단된다. 또한 소성변형 및 균열에 대한 저항성 등을 평가할 수 있는 실내 공용성 평가를 수행하고 이를 개선할 수 있는 방안을 모색하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

REFERENCE

AAHSTO (2007), Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage. AASHTO T 283, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.

AAHSTO (2007), Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). AASHTO TP 62, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.

H.U. Bahia, T.P. Friemel, P.A. Peterson, J.S. Russell, and B. Poehnelt (2007), "Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67.

K. H. Kim et al. (2008), Physical and Chemical Characteristics of Solvent-Insolubles and Solvent-Solubles in Oilsands Bitumen, J. Energy Eng., 17, 38.

K. Kimber (2007): "Heavy Oil", Chevron.

Nu, N. Refining Alberta's Energy Advantage (2007): An Unprecedented Investment Opportunity. Alberta Employment, Immigration and Industry.

Yang S (2014), "Evaluation of Applicability of Heavy Oil Upgrading By-Product(Pitch) as A Pavement Paving Material" International Journal of Highway Engineering Vol. 16, No. 5,

pp. 9-18.

Yun T, Ham S, Yoo P (2013), "Characteristics of Dynamic Shear Modulus Mastercurve of Aged or Unaged Asphalt Binders" International Journal of Highway Engineering Vol. 15, No. 1, pp. 87-94.